

TEKNILLINEN KORKEAKOULU
RAKENNUS- JA YMPÄRISTÖTEKNIIKAN OSASTO

Miikka Hakari

SIVUTUOTTEIDEN MAARAKENNUSKÄYTÖN OHJEISTUS – BETONIMURSKE JA PÄÄKAU- PUNKISEUDUN KIVIHILITUHKAT

Pohjarakennuksen ja maamekaniikan syventymiskohteen diplomityö, joka on jätetty opinnäytetyönä tarkastettavaksi diplomi-insinöörin tutkintoa varten.

Espoossa 6.4.2007

Valvoja: Professori Pauli Vepsäläinen

Ohjaaja: Diplomi-insinööri Juha Forsman

Tekijä:	Miikka Hakari		
Työn nimi:	Sivutuotteiden maarakennuskäytön ohjeistus – betonimurske ja pääkaupunkiseudun kivihiilituhkat		
Päivämäärä:	6.4.2007	Sivumäärä:	126 s. + liitteet 69 s.
Osasto:	Rakennus- ja ympäristötekniikan osasto	Professuuri:	Pohjarakennus ja maamekaniikka
Työn valvoja:	Professori Pauli Vepsäläinen		
Työn ohjaaja:	DI Juha Forsman		
Avainsanat:	Sivutuotteet, pohjatuhka, lentotuhka, betonimurske, jäte, kierrätys		

Tässä diplomityössä käsitellään pohjatuhkan, lentotuhkan ja betonimurskeen hyötykäyttöä maarakennusmateriaalina. Työ sisältää pohjatuhka-, lentotuhka- ja betonimurskerakentamisen ohjeet sekä pohjatuhkan koerakentamis- ja laboratoriotutkimusosan. Lisäksi työhön on koottu kirjallisuudessa esitetyjä ohjeita ja ominaisuuksia pohjatuhkalle, lentotuhkalle ja betonimurskeelle.

Diplomityön yhteydessä Lohja Rudukselle laaditut käyttöohjeet maarakentamiselle pohjatuhkalla, lentotuhkalla ja betonimurskeella ohjeistavat materiaalien hyötykäyttöä maarakentamisessa ”Valtioneuvoston asetus eräiden jätteiden hyödyntämisestä maarakentamisessa” [591/2006] mukaisesti. Ohjeiden on tarkoitus toimia apuna urakoitsijoille ja suunnittelijoille rakennettaessa tai suunniteltaessa kyseisillä materiaaleilla.

Pohjatuhkan koerakentaminen toteutettiin Helsingin Viikissä ja Hyvinkäällä vuonna 2006. Koerakentamisella pyrittiin lisäämään käytännön tietoutta Martinlaakson ja Suomenojan voimalaitosten pohjatuhkien käytöstä maarakennusmateriaalina sekä koerakenteen geoteknisistä ominaisuuksista.

Pohjatuhkan laboratoriotutkimukset tehtiin ennakkokokeina koerakentamista varten ja kokeilla pyrittiin selvittämään Martinlaakson ja Suomenojan voimalaitosten pohjatuhkien geoteknisiä ominaisuuksia.

Betonimurskeen käytöstä maarakentamisessa on pitkäaikaiset ja hyvät kokemukset Suomessa. Pohjatuhka ja lentotuhka ovat myös varteenotettavia materiaalivaihtoehtoja rakennettaessa tien ja kadun päällysrakennekerroksia, kenttärakenteita, pengertäyttiä sekä muita täyttiä. Rakentamisessa suositellaan noudatettavaksi huolellista rakennustapaa ja tämän diplomityön sisältämiä ohjeita.

Author:	Miikka Hakari		
Name of the thesis:	By-product instructions to earth construction – crushed concrete and coal ash		
Date:	6.4.2007	Number of pages:	126 p.+ appendices 69 p.
Department:	Department of Civil and Environmental Engineering	Chair:	Soil Mechanics and Foundation Engineering
Supervisor:	Pauli Vepsäläinen, Professor		
Instructions:	Juha Forsman, M.Sc. (Tech)		
Keywords:	By-products, bottom ash, fly ash, crushed concrete, waste, utilization		
<p>This thesis explores bottom ash, fly ash and crushed concrete utilization possibilities in earth construction. Thesis consists of bottom ash, fly ash and crushed concrete instructions, bottom ash case studies and laboratory tests. It also includes bottom ash, fly ash and crushed concrete instructions and properties from the literature.</p> <p>Bottom ash, fly ash and crushed concrete instructions were drafted for Lohja Rudus during the work of this thesis. Instructions guide the utilization of the materials as recommended in government regulation of bottom ash, fly ash and crushed concrete utilization in earth constructions [VNa 591/2006]. Instructions of bottom ash, fly ash and crushed concrete in this thesis are meant to be as a guide book for contractor and designer in construction and design work.</p> <p>Bottom ash case studies were put into practice in Helsinki and Hyvinkää in 2006. Main purpose was to achieve practical experience of bottom ash building and to measure geotechnical properties of the structure.</p> <p>Laboratory tests of bottom ash were carried out as preliminary tests before case studies to figure out geotechnical properties.</p> <p>Bottom ash, fly ash and crushed concrete are suitable possibilities for building materials in street and road pavement structures, yard and field structures, embankment fill and other applications. When building it is advised to build and design with care and follow the instructions of this thesis.</p>			

Alkusanat

Tämä työ on tehty opinnäytetyönä Teknillisen korkeakoulun Pohjarakennus ja maamekaniikan laboratoriolle. Työn valvojana on toiminut professori Pauli Vepsäläinen ja ohjaajana DI Juha Forsman.

Työn on rahoittanut Lohja Rudus Oy Ab ja työ on tehty Ramboll Finland Oy:n tiloissa.

Diplomityön tekemistä on ohjannut ohjausryhmä, johon ovat kuuluneet:

Antti Määttänen, DI	Lohja Rudus Oy Ab
Juha Forsman, DI	Ramboll Finland Oy
Jorma Havukainen, DI	Ramboll Finland Oy.

Haluan kiittää kaikkia työtä avustaneita neuvoista, materiaalista ja kommenteista, joita olen työn aikana saanut. Erityiskiitokset haluan esittää ohjausryhmän jäsenille mahdollisuudesta diplomityön tekemiseen.

Teknillisen korkeakoulun Pohjarakennus ja maamekaniikan laboratorion henkilökuntaa haluan kiittää neuvoista, avusta sekä työtiloista ja tutkimuslaitteista. Lisäksi haluan kiittää Timo Paanasta NHP Oy:stä koerakentamisen avustamisesta.

Espoossa, huhtikuun 6. päivänä 2007

Miikka Hakari

Sisällysluettelo

Alkusanat.....	4
Sisällysluettelo.....	5
Lyhenteet	8
1. Johdanto	10
2. Eräät sivutuotteet maarakentamisessa	13
2.1 Pohjatuhkan, lentotuhkan ja betonimurskeen perustiedot.....	13
2.1.1 Pohjatuhkan perustiedot	13
2.1.2 Lentotuhkan perustiedot	15
2.1.3 Betonimurskeen perustiedot	17
2.2 Pohjatuhkan, lentotuhkan ja betonimurskeen hyödyntäminen maarakentamisessa	19
2.2.1 Pohjatuhka maarakentamisessa	19
2.2.2 Lentotuhka maarakentamisessa	19
2.2.3 Betonimurske maarakentamisessa.....	20
2.3 Valtioneuvoston asetus eräiden jätteiden hyödyntämisestä maarakentamisessa	22
2.3.1 Asetuksen esittely.....	22
2.3.2 Hyödyntämisen valmistelu	23
2.3.3 Soveltamisalat	24
2.3.4 Vaatimukset.....	25
2.3.5 Ympäristövaikutukset.....	26
3. Pohjatuhka-, lentotuhka- ja betonimurskeohjeet	27
3.1 Olemassa olevat ohjeet ja niiden sisältö.....	27
3.2 Ohjeiden päivittämisen periaate	29
3.2.1 Pohjatuhkaohje	29
3.2.2 Lentotuhkaohje	29
3.2.3 Betoroc-ohje	30
4. Pohjatuhkakoerakentaminen	31
4.1 Viikin pohjatuhkakoerakenteet	31
4.1.1 Yleistä.....	31

4.1.2	Koerakentaminen.....	34
4.1.3	Kenttäkokeiden suorittaminen.....	38
4.1.4	Kenttäkokeiden tulosten analysointi	40
4.2	Hyvinkään koerakenteet	47
4.2.1	Yleistä.....	47
4.2.2	Koerakenteet.....	48
4.2.3	Kenttäkokeet.....	51
4.2.4	Yhteenveto mittaustuloksista	56
5.	Martinlaakson ja Suomenojan voimalaitoksen pohjatuhkien laboratoriokokeet .	
	58
5.1	Laboratoriokokeiden suoritus.....	58
5.1.1	Areometri ja kuivaseulonta	58
5.1.2	Proctor-koe	58
5.1.3	Kiintotiheys	59
5.1.4	Kolmiakselikoe.....	59
5.1.5	Vesipitoisuusmääritys	61
5.1.6	Rasialeikkauskoe	61
5.1.7	Rowen ödometri	62
5.1.8	Vedenläpäisevyys	63
5.1.9	Kapillaarisuus	64
5.1.10	Puristuslujuus	64
5.2	Laboratoriokokeiden tulokset ja niiden analysointi	65
5.2.1	Rakeisuus.....	65
5.2.2	Proctor-koe	69
5.2.3	Kiintotiheys	72
5.2.4	Kolmiakselikoe.....	73
5.2.5	Vesipitoisuus	75
5.2.6	Kitkakulma ja koheesio	76
5.2.7	Kokoonpuristuvuus	78
5.2.8	Vedenläpäisevyys	79
5.2.9	Kapillaarisuus	80
5.2.10	Puristuslujuus	80

6.	Tuhkaparametrit ja -rakentaminen	82
6.1	Pohjatuhka	82
6.1.1	Kirjallisuudessa esitetyt parametrit	82
6.1.2	Kirjallisuudessa esitetyt rakentamisohjeet	84
6.2	Lentotuhka	85
6.2.1	Kirjallisuudessa esitetyt parametrit	85
6.2.2	Kirjallisuudessa esitetyt rakentamisohjeet	88
7.	Betonimurskeparametrit	93
7.1	”Betonimurskeen mitoitusparametrit” – raportissa esitetyt parametrit	93
7.2	Muussa kirjallisuudessa esitetyt betonimurskeen parametrit	98
7.2.1	Betonimurskeohjeistuksen vertailu	98
7.2.2	Ruotsin käytäntö	99
7.2.3	Norjan käytäntö	103
7.2.4	Tanskan käytäntö	105
7.3	Uusien betonimursketuotteiden (BeM Hk, BeM Sr ja BeM Lo) parametrit ..	107
7.4	Muut kiviainespohjaiset jätteet	110
7.4.1	Betonikiviaines	110
7.4.2	Tiilimurske	112
7.4.3	Betonimurskesekoitukset	113
8.	Yhteenveto	115
9.	Kirjallisuusluettelo	118
	Liitteet	126

Lyhenteet

BeM	Betonimurske
bar	Paineen lisäyksikkö (1 bar = 100 kPa)
d ₁₀	Läpäisyprosenttia 10 vastaava raekoko (mm)
d ₂₀	Läpäisyprosenttia 20 vastaava raekoko (mm)
d ₅₀	Läpäisyprosenttia 50 vastaava raekoko (mm)
d ₆₀	Läpäisyprosenttia 60 vastaava raekoko (mm)
CADC	Avoin kolmiakselikoe
CAUC	Suljettu kolmiakselikoe
C _c	Kaarevuussuhde (-)
C _u	Raekokosuhde (-)
c'	Tehokas koheesio (kPa)
D	Tiiviysaste (%)
E ₁	Kantavuusmittauksen ensimmäinen lukema (MPa)
E ₂	Kantavuusmittauksen toinen lukema (MPa)
e ₀	Huokosluku ennen konsolidointia (-)
e ₁	Huokosluku konsolidoinnin jälkeen (-)
E ₅₀ -moduuli	Materiaalin 50 % jännitystä vastaava muodonmuutosmoduuli (MPa)
Gjb	Norjalainen betonimurskeen laatuluokka
Hiilipölytuhka	Hiilipölykattilan pohjatuhka
Leijupetituhka	Leijupetikattilan pohjatuhka
LT	Lentotuhka
M	Kriittisen tilan jännityssuhde
Paino-%	Painoprocenttia
PVC	Polyvinyylikloridi on muovilaatu
PT	Pohjatuhka
RPT	Rikinpoiston lopputuote
rtr	Rakenneteoreettinen tilavuus
VNa	Valtioneuvoston asetus eräiden jätteiden hyödyntämisestä maarakentamisessa

w	Vesipitoisuus (%)
w_{opt}	Optimivesipitoisuus (%)
ε_1	Kokoonpuristuvuus (%)
σ_1	Normaalijännitys ödometrissa (kPa)
σ_v	Normaalivoima rasialeikkauskokeessa (kPa)
γ_d	Kuivatilavuuspaino (kN/m ³)
$\gamma_{d,max}$	Maksimikuivatilavuuspaino (kN/m ³)
ρ_0	Tiheys (g/cm ³)
ρ_s	Kiintotiheys (g/cm ³)
τ	leikkausjännitys (kPa)
φ'	Tehokas kitkakulma (°)

1. Johdanto

Suomessa käytetään vuosittain 70–90 miljoonaa tonnia luonnon kiviaineksia rakentamisessa [Eduskunta 2006]. Teollisessa toiminnassa ja rakentamisessa syntyy suuria määriä maarakentamisessa hyötykäyttöön soveltuvia jätteitä, kuten tuhkaa ja betonimursketta. Kesällä 2006 voimaan astunut Valtioneuvoston asetus eräiden jätteiden hyödyntämisestä maarakentamisessa [VNa 591/2006] mahdollistaa tuhkan ja betonimurskeen ohjeistetun käytön maarakentamisessa ilmoitusmenettelyllä tietyin reunaehdoin. Siten hyödyntämisestä tulee entistä kilpailukykyisempää. VNa 591/2006 käsittää seuraavat jätenimikkeet: betonimurske, kivihiilen, turpeen ja puuperäisen aineksen polton lentotuhkat ja pohjatuhkat. Asetuksen tavoitteena on korvata luonnon maa- ja kiviaineksen käyttöä maarakentamisessa teknisesti käyttökelpoisilla, soveltamisalaan kuuluvilla uusiomateriaaleilla.

Vaikka Suomessa on luonnonkiviaineksia rakentamiseen riittävästi käytettävissä, pyritään uusiomateriaalien käyttäminen maarakennusmateriaalina pitämään kannattavana vaihtoehtona. Uusiomateriaalien käytön etuja ovat uusiutumattomien luonnonvarojen ja kaatopaikkatilan säästäminen sekä yleensä lyhyemmät kuljetusmatkat.

Betoni- ja tiilijätettä syntyy noin 600 000–800 000 tonnia vuodessa. Hyödynnettävän osuuden arvioidaan olevan noin 60–70 %. [Määttänen 2007]. Suurin osa vuosittaisesta betonijätteestä syntyy purkutyömailla ja hyödyntäminen tapahtuu lähes yksinomaan maarakentamisessa. Hyödynnettävissä olevan betonijätteen hyötykäyttöaste on lähes 100 %, koska teräs erotetaan betonista terästeollisuuden käyttöön. Suomi on Euroopan maista johtavia betonin kierrättäjiä. [Määttänen 2000].

Kivihiilivoimalaitosten energian ja sähkön tuotannon sivutuotteena syntyvä kivihiilen palamisjäte koostuu pääasiassa lentotuhkasta (noin 83 %). Pohjatuhkan osuus on noin 12 % ja loput jätteestä (noin 5 %) on rikinpoiston lopputuotetta. [Finnlund 2004]. Suomessa kivihiilen poltossa syntyy vuosittain yli 500 000 t lentotuhkaa ja noin 90 000 t pohjatuhkaa [Helsingin Energia 2007]. Uudenmaan alueella kivihiilen polton jätteiden hyödyntämisaste on keskimäärin noin 76 %. Pohjatuhkan käytetään kokonaisuudessaan maara-

kentamisessa ja samoin merkittävä osa lentotuhkasta ja rikinpoistojätteestä. [Finnlund 2004, Lahtinen et al. 2005].

Valtioneuvoston asetuksen alaisten sivutuotteiden hyödyntämisen toivotaan lisääntyvän uuden ilmoitusluontoisen lupamenettelyn ja selkeiden käyttöohjeiden takia entisestään. Yleisten sivutuotteiden käyttöön liittyvien ennakkoluulojen lisäksi elinkaarivastuun ja teknisten ratkaisujen valinnan siirtyminen rakentajille ei välttämättä edistä uusiomateriaalien käyttöä vaan tyydytään perinteisiin, varmoihin ratkaisuihin [Lahtinen et al. 2005].

Diplomityön runkona toimii Lohja Rudukselle työssä laaditut käyttöohjeet betonimurskeen, pohjatuhkan ja lentotuhkan käytölle maarakentamisessa (liitteet 1-3) VNa 591/2006 mukaisesti. Käyttöohjeiden on tarkoitus toimia yksinkertaisena ohjeena urakoitsijalle ja suunnittelijalle rakennettaessa tai suunniteltaessa kyseisillä materiaaleilla. Ohjeet otetaan koekäyttöön kevään 2007 aikana. Laatimisessa on toiminut ohjaajana asiantuntijaryhmä: Juha Forsman, Jorma Havukainen / Ramboll Finland ja Antti Määttänen, Petri Ilama, Tuomo Joutsenoja / Lohja Rudus, joka kokoontui ohjauspalavereihin noin kerran kuukaudessa 04/06–03/07 välillä. Lisäksi ohjeita ovat kommentoineet useat tulevat käyttäjät.

Ohjeita laadittaessa käytiin läpi betonimursketta, pohjatuhkaa ja lentotuhkaa koskevaa tausta-aineistoa kotimaisista ja ulkomaisista julkaisuista. Koottu tausta-aineisto toimii perustana laadituille ohjeille ja samalla vertailunäkökulmana muiden maiden käytäntöön.

Tutkimus sisälsi myös koerakentamista pohjatuhkalla Helsingin Viikissä ja Hyvinkäällä sekä laboratoriokokeita Teknillisessä korkeakoulussa. Koerakentamisella pyrittiin saamaan käytännön kokemuksia hyödynnettäväksi ohjeiden laatimisessa. Koerakentaminen koettiin tärkeäksi myös, koska käytetyistä Suomenojan ja Martinlaakson voimalaitosten pohjatuhkista on vain vähän dokumentoituja kokemuksia. Laboratoriokokeilla selvitettiin Viikin työmaalla käytettyjen pohjatuhkalaatujen käyttäytymistä laboratorioolosuhteissa ennen rakentamista.

Viikin kohteen talonvierus- ja putkilinjatäyttöjä rakennettiin kolmella pääkaupunkiseudun pohjatuhkalla. Martinlaakson voimalaitoksen hiilipölytuhkaa (270 t), Suomenojan voimalaitoksen hiilipölytuhkaa (140 t) ja Suomenojan leijupetituhkaa (88 t) käytettiin koerakennuskohteessa yhteensä noin 700 tonnia. Koerakennus käsitti ennakkokokeita Teknillisen korkeakoulun maalaboratoriossa ja kenttäkokeita Viikin työmaalla.

Pohjatuhkarakentamista kokeiltiin myös Hyvinkään Kiertokapulan kaatopaikalla. Koerakentamisella haluttiin tietoa pohjatuhkan käyttäytymisestä märkänä, lähellä liettymisrajaa. Martinlaakson hiilipölytuhkalla tehdyistä rakenteista määritettiin kantavuuden ja tiivistyskertojen lukumäärän välistä yhteyttä. Kantavuutta mitattiin pehmeällä ja kovalla alustalla.

Betonimurskeella ja lentotuhkalla rakentamisesta on niin paljon käytännön kokemusta, että niillä koerakentamista tässä työssä laaditun ohjeistuksen tueksi ei pidetty välttämättömänä.

2. Eräät sivutuotteet maarakentamisessa

2.1 Pohjatuhkan, lentotuhkan ja betonimurskeen perustiedot

2.1.1 Pohjatuhkan perustiedot

Pohjatuhka syntyy kivihiilivoimalaitoksen polttoprosessin palamistuotteena. Pohjatuhka kerätään talteen polttokattilan pohjalta ja varastoidaan voimalaitoksen pihalle tai muulle ympäristöluvan saaneelle alueelle.

Hiilen pölypolton sivutuotteena syntyvä hiilipölykattilan eli arinakattilan pohjatuhka on kivetön materiaali, jonka rakeisuus vaihtelee silttisestä hiekasta soraiseen hiekkaan riippuen polttolaitoksesta ja poltetun hiilen laadusta. Suurin osa Suomessa syntyvästä pohjatuhkasta on hiilipölykattilan pohjatuhkaa. Kirjallisuudessa termillä ”pohjatuhka” tarkoitetaan tavallisesti hiilipölykattilan pohjatuhkaa ja samaa menettelyä on noudatettu tässä diplomityössä. Kuvassa 2.1 on esitetty Martinlaakson kivihiilivoimalaitoksen pohjatuhkaa.

Leijupetikattilassa kivihiili poltetaan hiekka-/sorakerroksen päällä. Leijupetikattilan pohjatuhka sisältää kiviainesta ja rakeisuudeltaan se vastaa luonnonmateriaaleista lähinnä hiekkaista soraa. Leijupetikattilan pohjatuhkaa syntyy Suomessa vain Suomenojan voimalaitoksessa.

Pohjatuhkan vesipitoisuus on korkea suoraan voimalaitokselta tuotaessa, koska tuhka jäähdytetään vedellä. Normaalisti ylimääräinen vesi poistuu välivarastoinnin aikana.

Pohjatuhkan pääainesosat ovat piidioksidi, alumiiniumoksidi ja rautaoksidi [Viatek Oy 2001]. Hanasaaren voimalaitoksen pohjatuhkan kemiallinen koostumus on esitetty taulukossa 2.1. Pohjatuhkan geotekniset perusominaisuudet on esitetty taulukossa 2.2.



Kuva 2.1. Martinlaakson hiilipölykattilan pohjatuhkaa vasemmalla ja oikealla vertailumateriaalina kalliomursketta # 32/45 mm.

Taulukko 2.1. Pohjatuhkan kemiallinen koostumus (Hanasaaren voimalaitoksen pohjatuhka) [Tekes 2000].

Kemiallinen yhdiste	Paino-%
Piidioksidi, SiO_2	34,2
Alumiinioksidi, Al_2O_3	11,6
Magnesiumoksidi, MgO	2,6
Kalsiumoksidi, CaO	4,4
Rautaoksidi, Fe_2O_3	7,6
Titaanidioksidi, TiO_2	0,7
Natriumoksidi, Na_2O	0,5
Kaliumoksidi, K_2O	1,2
Sulfiitti, SO_3	0,2
Fosforioksidi, P_2O_5	0,1

Taulukko 2.2. Pohjatuhkan geotekniset perusominaisuudet, jotka on määritetty kirjallisuuden (taulukko 6.1) sekä TKK:lla ja Lohja Ruduksella 2006 (liite 13) tehtyjen laboratoriokokeiden perusteella.

Ominaisuus	Hiilipölytuhka	Leijupetituhka
Rakeisuus	0,002–16 mm	0,063–32 mm
Lujittuminen	ei lujitu / lujittuu heikosti	ei lujitu
Routivuus	routimaton	routimaton
Optimivesipitoisuus	16–24 %	11–17 %
Maksimikuivatilavuuspaino	10–15 kN/m ³	15 kN/m ³
Puristuslujuus (28d)	0-0,3 MPa	0,22 MPa
E-moduuli	50–100 MPa	-
Vedenläpäisevyys	10 ⁻⁵ –10 ⁻⁶ m/s	10 ⁻³ –10 ⁻⁴ m/s
Lämmönjohtavuus	0,9 W/mK	-

2.1.2 Lentotuhkan perustiedot

Lentotuhka on kivihiilen polttoprosessin sivutuotteen syntyvä hienojakoinen tuhkalaatu. Lentotuhka erotetaan savukaasuista sähkö- tai letkusuodattimilla. Lentotuhka varastoidaan kuivana siilossa tai kosteana avokasoissa.

Lentotuhkan pääainesosat ovat pii-, alumiini- ja rautayhdisteitä (kvartsi, mulliitti, hemaatti ja magnetiitti) [Finergy 2001]. Lentotuhkan kemiallinen koostumus on esitetty taulukossa 2.3.

Lentotuhka on kivetön materiaali, jonka rakeisuus vastaa luonnonmateriaaleista lähinnä silttiä. Lentotuhkan geotekniset perusominaisuudet on esitetty taulukossa 2.4.

Lentotuhkan materiaalikoostumus on esitetty kuvassa 2.2.

Taulukko 2.3. Lentotuhkan kemiallinen koostumus [Mäkelä & Höynälä 2000].

Kemiallinen yhdiste	Paino-%
Piidioksidi, SiO ₂	45–55
Alumiinioksidi, Al ₂ O ₃	20-30
Rautaoksidi, Fe ₂ O ₃	8-11
Kalsiumoksidi, CaO	4-7
Magnesiumoksidi, MgO	3-5
Kaliumoksidi, K ₂ O	1-2
Natriumoksidi, Na ₂ O	0-2

Taulukko 2.4. Lentotuhkan geotekniset perusominaisuudet, jotka on määritetty kirjallisuudesta (taulukko 6.2).

Ominaisuus	Lentotuhka
Rakeisuus	0,002–0,1 mm
Lujittuminen	siilossa varastoitu lujittuu, kasavarastoidun lujittuminen vaihtelee
Routivuus	routivaa lujittumattomana, lujittuneena routivuus vaihtelee routimattomasta routivaan
Optimivesipitoisuus	18–25 %
Maksimikuivatilavuuspaino	12–15 kN/m ³
Puristuslujuus (28d)	> 0,5 MPa
E-moduuli	kasavarastoitu 50–150 MPa (lujittumaton tai heikosti lujittunut), siilovarastoitu 150–350 MPa (lujittunut)
Vedenläpäisevyys	10 ⁻⁶ –10 ⁻⁷ m/s, lujittuneena 10 ⁻⁶ –10 ⁻⁸ m/s
Lämmönjohtavuus	hyvin tiivistettynä 0,4–1,0 W/mK



Kuva 2.2. Kuivaa siilovarastoitua lentotuhka. Mittakaavana ruutupaperi (ruutu 5 mm).

2.1.3 Betonimurskeen perustiedot

Betonimurskeen raaka-aine eli betonijäte on peräisin rakennus- ja purkutyömaalta tai betonteollisuudesta. Vuonna 2004 syntyi noin 450 000 t kiviainespohjaisia talonrakennus- ja purkutyömaiden jätteitä. Kiviainespohjaisen jätteen osuus on 28 % talonrakennus- ja purkutyömaiden kokonaisjättemäärästä. Kokonaismäärästä (1,6 milj. tonnia) kierätettiin noin 54 %. [Tilastokeskus 2006]. Todellinen kiviainespohjaisen jätteen määrän arvioidaan kuitenkin olevan suurempi (noin 600 000–800 000 tonnia) [Määttänen 2007].

Betonijäte on oltava lajiteltu muista rakennusmateriaaleista ja se ei saa sisältää epäpuhtauksia, kuten puuta, muovia tai maa-ainesta. Betonijätettä, joka sisältää haitta-aineita, kuten PCB, kreosootti, asbesti, öljy, sulfaatti tai raskasmetalleja ei kelpuuteta betonimurskeen raaka-aineeksi. [Lohja Rudus 2007].

Raaka-aine muutetaan maarakennuskäyttöön soveltuvaksi murskaamalla tai muulla mekaanisella käsittelyllä ja seulomalla haluttuun fraktioon. Raaka-aine tarkastetaan vas-

taanottotilanteessa aistinvaraisesti, käyttäen apuna kuormantarkastustasoa tai värikameraa [Lohja Rudus 2006a]. Lisäksi betonijätteestä erotetaan murskausvaiheessa raudat kierrätykseen terästeollisuuden raaka-aineeksi. Mahdolliset epäpuhtaudet poistetaan lajittelemalla murskattu aines koneellisesti tai käsityönä. Syntyvän betonimurskeen laatua tarkkaillaan murskausvaiheessa silmämääräisesti ja ympäristökelpoisuutta koskevien testien avulla. [Juvonen 2006, Lohja Rudus 2007, Lohja Rudus 2006a].

Betonimurskeen geotekniset ominaisuudet määräytyvät murskatun raaka-aineen ja seulonnan mukaan. Suomessa käytössä olevien laatuluokkien BeM I, BeM II, BeM III, BeM IV ominaisuudet on esitelty tarkemmin luvussa 7.1. Laatuluokka määräytyy mm. puhtausasteen ja rakeisuuden mukaan. [Lohja Rudus 1999].

Betonimurskeen geotekniset perusominaisuudet parhaiten maarakennukseen soveltuville laatuluokille (BeM I, BeM II ja BeM III) on esitetty taulukossa 2.5.

Betoniteollisuudessa syntyvää betonijätettä ja sen käsittely on esitetty kuvassa 2.3.

Taulukko 2.5. Parhaiten maarakennukseen soveltuvien betonimurskeluokkien (BeM I, BeM II ja BeM III) geotekniset perusominaisuudet, jotka määritetty kirjallisuudesta (taulukko 7.2) sekä laboratoriomittauksista [Lohja Rudus 2006a].

Ominaisuus	Betonimurske
Rakeisuus	0–45 mm
Lujittuminen	lujittuu/ei lujitu, riippuu materiaalin laadusta ja jälkihoidosta
Routivuus	pääasiassa routimaton, riippuu materiaalin laadusta ja jälkihoidosta
Optimivesipitoisuus	8–14 %
Maksimikuivatilavuuspaino	17,5–20,5 kN/m ³
Puristuslujuus (28d)	> 1,2 MPa (BeM I), > 0,8 MPa (BeM II)
E-moduuli	700–280 MPa
Vedenläpäisevyys	10 ⁻⁵ m/s



Kuva 2.3. Betoniteollisuuden jäte-elementtejä murskataan ja erotetaan rakenneteräksestä välivarastointialueella [Aurstad et al. 2004].

2.2 Pohjatuhkan, lentotuhkan ja betonimurskeen hyödyntäminen maarakentamisessa

2.2.1 Pohjatuhka maarakentamisessa

Pohjatuhkaa käytetään maarakentamisessa korvaamaan saman rakeisuuden omaavia luonnon kiviaineksia, kuten hiekkaa tai soraa. Pohjatuhkan pääasialliset käyttökohteet ovat katujen ja kevyenliikenteenväylien suodatinkerroksessa, pengertäytössä, kenttärakenteissa, arinarakenteissa ja muissa täytöissä. [Helsingin Energia, Viatek Oy 2001].

Energian tuotannossa syntyvä pohjatuhka käytetään Suomessa kokonaisuudessaan maarakentamiseen [Helsingin Energia 2006].

2.2.2 Lentotuhka maarakentamisessa

Lentotuhkaa voidaan käyttää korvaamaan luonnon maa- ja kiviaineksia rakentamisessa. Lentotuhkaa voidaan käyttää tie- ja katurakenteissa, kenttärakenteissa, pengertäytöissä ja putki- ja viemäriinjojen arinarakenteissa sekä ympärystäytöissä liikennettä varten tarpeellisilla alueilla [Mäkelä & Höynälä 2000, VNa 591/2006].

Maarakentamisen lisäksi lentotuhkaa hyödynnetään betoni- ja asfalttiteollisuudessa sekä kaivostäytössä. Lentotuhka soveltuu myös stabiloinnin sideaineeksi [Ramboll Finland 2007].

Saksassa käytetään kivihiilen tuhkaa Suomen tavoin tierakenteissa sekä saastuneiden maiden stabiloinnissa. Hollannissa lentotuhkaa käytetään keinotekoisien soran tuotannossa ja asfalttifillerinä. Suurin osa lentotuhkasta hyödynnetään kuitenkin sementtiteollisuudessa pääosassa Euroopan maista. [Airiola 1996]. Amerikassa lentotuhka on luokiteltu materiaaliksi, jolla on erittäin korkea hyötykäyttöpotentiaali ja esikäsittelyn tarve on suhteellisen vähäinen [Maijala 1996].

Samaris-projektin [Beuving et al. 2005] yhteydessä laadittu yhteenvetotaulukko lentotuhkan käyttökelpoisista sovelluksista sitomattomana tai stabiloituna kerroksena tierakenteessa on esitetty taulukossa 2.6.

Taulukko 2.6. Lentotuhkan soveltuvuus eri tierakennekerroksiin sitomattomana ja stabiloituna [Beuving et al. 2005].

	Kulutuseros			Kantava kerros			Jakava kerros		Alusrakenne		Pengerrys, täyteaines
	I-a	I-b	I-c	II-a	II-b	II-c	III-a	III-c	IV-a	IV-c	V-a
Tekn.	—	+	+	—	+	+	—	+	+	+	+
Ymp.	—	+	+	+	+	+	+	+	+	+	—

a = sitomaton rakennekerros

Tekn. = teknilliset ominaisuudet

+ = soveltuva

b = bitumilla stabiloitu rakennekerros

Ymp. = ympäristökelpoisuus

— = ei suositeltava

c = sementillä stabiloitu rakennekerros

2.2.3 Betonimurske maarakentamisessa

Betonimursketta käytetään maarakentamisessa yleensä samalla tavalla kuin luonnon kiviaineita, lähinnä sora- ja kalliomurskeita. Mikäli betonimurskeen lujittumisominaisuus hyödynnetään, voidaan rakenteen kerrospaksuus yleensä tehdä ohuempana kuin luonnon kiviaineilla. [Mäkelä & Höynälä 2000].

Betonimurskeen pääasialliset käyttökohteet ovat sitomattomat katu-, tie- ja kenttärakenteiden jakavat ja kantavat kerrokset. Betonimursketta voidaan käyttää myös erilaisissa täytöissä ja putkijohtokaivantojen täytteenä [Määttänen 2000].

Samaris-projektin [Beuving et al. 2005] ohjeistamat käyttösuositukset rakennusten purkutyömaan betonimurskeelle tierakennekerroksissa sitomattomana ja stabiloituna rakennekerroksena on esitetty taulukossa 2.7.

Taulukko 2.7. Betonimurskeen soveltuvuus eri tierakennekerrokseen sitomattomana ja stabiloituna rakennekerroksena [Beuving et al. 2005]. Betonimurske on peräisin rakennusten purkutyömaalta.

	Kulutuskerros			Kantava kerros			Jakava kerros		Alusrakenne		Pengerrys, täyteaines
	I-a	I-b	I-c	II-a	II-b	II-c	III-a	III-c	IV-a	IV-c	V-a
Tekn.	+	—/+	+	+	+	+	+	+	+	—	+
Ymp.	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+

a = sitomaton rakennekerros

Tekn. = teknilliset ominaisuudet

+ = soveltuva

b = bitumilla stabiloitu rakennekerros

Ymp. = ympäristökelpoisuus

— = ei suositeltava

c = sementillä stabiloitu rakennekerros

Tiekohteesta peräisin oleva betonimurske soveltuu taulukon 2.7 kulutuskerroksen bitumilla stabiloidun rakennekerroksen (I-b) materiaaliksi sen tekniset ominaisuudet huomioiden kun taas rakennusten purun betonimurske ei sovellu [Beuving et al. 2005].

Suomessa betonimurskeen hyödyntäminen tapahtuu pääosin vaativissa, kantavuutta edellyttävissä rakenteissa, kuten sitomattomana päällysrakenteen kantavassa - ja jakavassa kerroksessa. Suomessa betonimurskeen hyödyntäminen on yleistä. Lohja Ruduksen referenssit rakennuskohteista, joissa on käytetty materiaalina betonimursketta, on esitetty liitteessä 4.

Betonimursketta voidaan käyttää vaativissakin sovelluksissa noudatettaessa huolellista suunnittelua. Esimerkiksi Eurooppatie E6 rakennettiin betonimurskeella Norjassa, Trondheimin kaupungin eteläpuolella Melhusissa vuosina 2003–2004. Tieosuus on raskaasti liikennöity ($KVL > 10000$). Betonimursketta käytettiin päällysrakenteen jakavassa kerroksessa korvaamaan saman paksuinen luonnon kiviaineskerros. Betonimurske oli peräisin elementtiteollisuuden jätteestä (kuva 2.3). Laatuluokka vastasi siten Suomessa käytettyä BeM I. Käytetyn betonimurskeen rakeisuudet (0–100 mm ja 20–100 mm) olivat karkeammat kuin Suomessa on ollut tapana ohjeistaa. Myöskään hienoainesta ei Suomessa seulota pois betonimurskeen rakeisuudesta. Tierakenteesta selvitettiin kenttäkokeilla mm. kevyen ja raskaan tiivistysjyrän tiivistystehokkuutta ja kantavuudet levykuormituskokeilla ja pudotuspainolaitteella. [Aurstad et al. 2004].

E6-Eurooppatien rakentamisen yhteydessä saatiin seuraavia käytännön kokemuksia betonimurskeesta:

- betonimurskeen varastokasa kasteltiin sprinklereillä ennen rakentamista ja tiivistämistä paremman käsiteltävyyden ja tiivistyvyyden takia,
- elementtiteollisuuden betonimurske voi sisältää terästä aiheuttaen ongelmia kumipyöräisille työkoneille, vaikka murskausvaiheessa teräs pyritään erottelemaan muusta aineksesta,
- betonimurskeen tiivistys aiheuttaa materiaalin karkean raeosuuden hienonemista,
- tiivistämällä 15 tonnin sileävalssijyrällä (1-valssinen) saavutettiin vain vähän lisäkantavuutta verrattuna 6 tonnin jyrällä tiivistettyyn osuuteen.

2.3 Valtioneuvoston asetus eräiden jätteiden hyödyntämisestä maarakentamisessa

2.3.1 Asetuksen esittely

Valtioneuvoston asetus eräiden jätteiden hyödyntämisestä maarakentamisessa [VNa 591/2006] on pitkään odotettu lainsäädännöllinen ohjeistus tuhkan ja betonimurskeen hyödyntämiselle maarakentamisessa. Asetus tuli voimaan 15.7.2006 ja sen sovellusalaan kuuluvat jätteet ovat:

- betonimurske,
- kivihiilen polton lentotuhkat ja pohjatuhkat,
- turpeen polton lentotuhkat ja pohjatuhkat sekä
- puuperäisen aineksen polton lentotuhkat ja pohjatuhkat.

Asetuksen soveltamisalaan valittuja jätteitä voidaan teknisin perustein käyttää maarakentamisessa ja niiden ympäristövaikutukset hallitaan [Pfister 2006]. VNa 591/2006 on esitetty liitteessä 5.

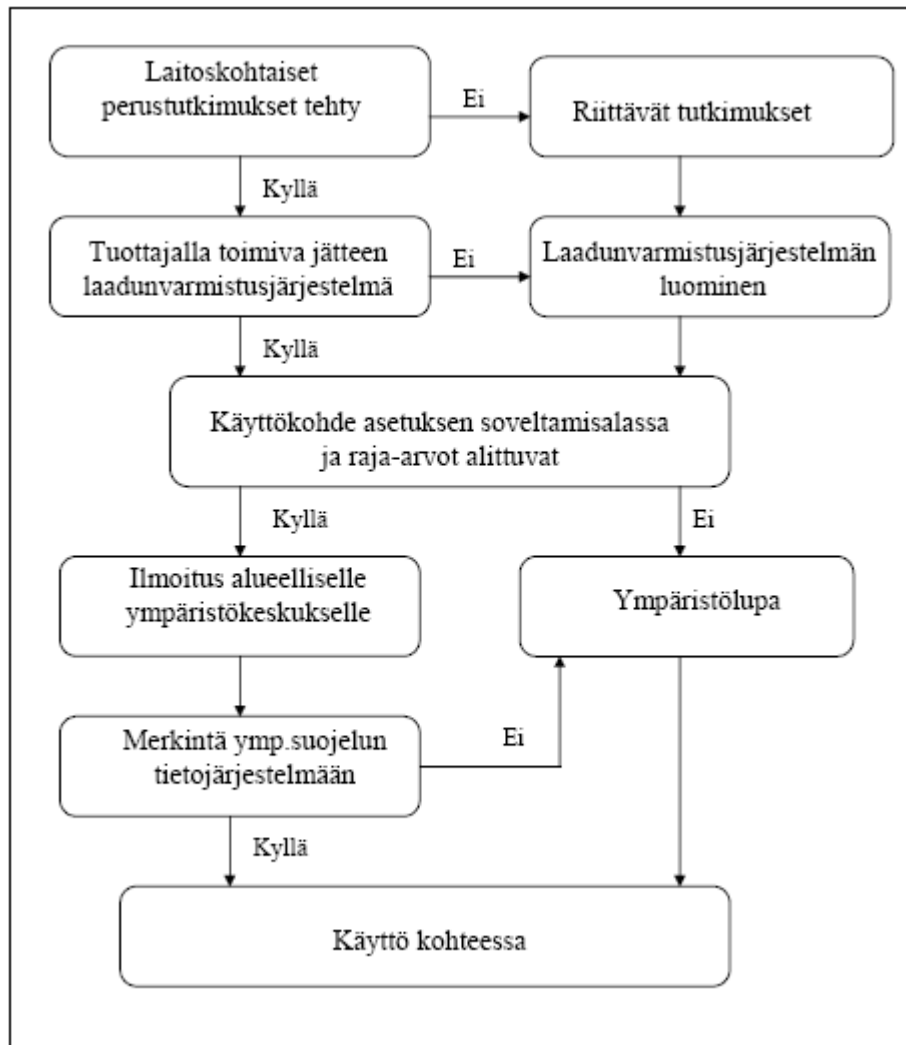
Asetuksen tausta-aineisto on esitettynä julkaisuissa ”Ehdotus Valtioneuvoston asetukseksi eräiden jätteiden hyödyntämisestä maarakentamisessa” [Pfister 2006] ja ”Tausta-aineistoa Valtioneuvoston asetuksen eräiden jätteiden hyödyntämisestä maarakentamisessa valmistelua varten” [Mroueh et al. 2006].

2.3.2 Hyödyntämisen valmistelu

VNa 591/2006 asettaa ehdot jätteen hyödyntämisen soveltamisaloille ja materiaalin ympäristökelpoisuudelle sekä rakenteen ominaisuuksille. VN:n vaatimusten täytyessä jätettä voidaan hyödyntää ilman ympäristölupaa (80/2000), tekemällä ilmoitus hyödyntämisestä alueelliselle ympäristökeskukselle. [VNa 591/2006]. Esimerkki VN:n vaatimusten mukaisesta ilmoituslomakkeesta on esitetty liitteessä 6.

VNa asettaa hyödynnettäville jätteille pitoisuus- ja liukoisuusvaatimukset perustutkimuksille ja laadunvalvontatutkimuksille [VNa 591/2006].

Soveltamisalaan kuuluvan jätteen hyötykäyttö etenee kuvan 2.4 toimintakaavion mukaisesti. Pohjatuhkan, lentotuhkan ja betonimurskeen hyödyntäminen voidaan aloittaa, kun toimitettu ilmoitus jätteen hyödyntämisestä maarakentamisessa on merkitty ympäristönsuojelun tietojärjestelmään.



Kuva 2.4. VNa 591/2006 soveltamisalaan kuuluvan jätteen hyödyntäminen [Mroueh et al. 2006].

2.3.3 Soveltamisalat

VNa:n vaatimukset täyttävää jätettä voidaan käyttää seuraavissa maarakentamiskohteissa ilman ympäristölupaa [VNa 591/2006]:

- yleiset tiet, kadut, pyörätiet ja jalkakäytävät sekä niihin välittömästi liittyvät tienpi-toa tai liikennettä varten tarpeelliset alueet, pois lukien meluesteet,
- pysäköintialueet,
- urheilukentät sekä virkistys- ja urheilualueiden reitit,
- ratapihat sekä teollisuus-, jätteenkäsittely- ja lentoliikenteen alueiden varastointi-kentät ja tiet.

Soveltamisalan maarakennustöiden on perustuttava maankäyttö- ja rakennuslain (132/1999) määrittelemiin yleisistä teistä annettuun lakiin (243/1954) tai maantielakiin (503/2005). Tällä menettelyllä varmistetaan, että jätteiden hyödyntäminen toteutetaan tarkoituksenmukaisen maarakentamisen yhteydessä, eikä todellisuudessa loppusijoittamiseksi tarkoitettussa toiminnassa. [Pfister 2006].

2.3.4 Vaatimukset

Ympäristösuojelulain (86/2000) ja jätelain (1072/1993) lisäksi on huolehdittava, että seuraavat VNa:n esittämät hyödyntämistä koskevat vaatimukset täyttyvät [VNa 591/2006]:

- jätteen haitallisten aineiden pitoisuus ja liukoisuus määritettynä VNa:n mukaisesti eivät ylitä säädettyjä raja-arvoja eikä jäte sisällä epäpuhtauksina muitakaan haitallisia aineita siten, että sen hyödyntämisestä voi aiheutua vaaraa tai haittaa terveydelle tai ympäristölle,
- sekoitettaessa teknisten ominaisuuksien parantamiseksi VNa:ssa määriteltäviä jätteitä keskenään tai lisättäessä jätteeseen kalkkia, sementtiä tai vastaavia sideaineita haitallisten aineiden liukeneminen ja muut ympäristölle tai terveydelle haitalliset päästöt jätteestä eivät sekoittamisen seurauksena lisäänty,
- käytetään vain maarakenteen tasauksen, kantavuuden ja kestävyys kannalta tarpeellinen määrä jätettä kuitenkin niin, että jätettä sisältävän rakenteen paksuus on enintään 1,5 m,
- jätettä sisältävä rakenne ei joudu kosketuksiin pohjaveden kanssa,
- jätettä sisältävän rakenteen etäisyys talousvesikäyttöön tarkoitetusta kaivosta tai lähteestä on vähintään 30 m,
- jätettä sisältävä rakenne peitetään tai päällystetään VNa:n mukaisesti,
- jätteen väliaikainen varastointi ja muu toiminta hyödyntämispaikalla järjestetään siten, että jätteen joutuminen ympäristöön estyy eikä toiminnasta aiheudu muutaakaan vaaraa tai haittaa terveydelle tai ympäristölle,
- jätteen varastointi hyödyntämispaikalla aloitetaan aikaisintaan neljä viikkoa tai, jos jäte varastoidaan suojattuna, kymmenen kuukautta ennen hyödyntämistä.

Asetuksessa esitetyillä vaatimuksilla pyritään estämään haitallisia määriä sisältävän jätteen hyödyntäminen. Jäte ei saa sisältää muitakaan haitallisia ainesosia siten, että hyödyntämisestä aiheutuisi vaaraa tai haittaa terveydelle tai ympäristölle. Vaatimuksilla tehdään myös selkeä ero hyödyntämisen ja loppusijoittamisen välillä, rajoittamalla kerrospaksuus enimmillään 1,5 m. [Pfister 2006].

2.3.5 Ympäristövaikutukset

Merkittävimpana ympäristö- ja terveysuhkana pidetään haitallisten aineiden kulkeutusta maaperään ja sitä kautta pohjaveteen. Toisaalta VNa 591/2006 rajaa soveltamisalueen ulkopuolelle jätteen, joka aiheuttaa maaperän pilaantumisen, pohjaveden pilaantumisen vaaran tai muuten vaarantaa terveyttä ja ympäristöä. Kokonaisuutena pohjaveden pilaantumisen riskiä pidetään pienenä, koska asetusta ei sovelleta lainkaan I–II-luokan pohjavesialueella. [Pfister 2006]. Esimerkiksi Uudellamaalla ja Itä-Uudellamaalla kartoitettuja ja luokiteltuja pohjavesialueita on yhteensä 510 kpl, joista 242 kuuluu luokkaan I, 96 luokkaan II ja loput luokkaan III [Uudenmaan ympäristökeskus 2007]. Jätteiden hyödyntäminen vesistön välittömässä läheisyydessä, kuten satama-alueiden kenttärakenteissa vaatii yleensä ympäristöluvan [Pfister 2006].

3. Pohjatuhka-, lentotuhka- ja betonimurskeohjeet

3.1 Olemassa olevat ohjeet ja niiden sisältö

Tuhkaa ja betonimursketta on tutkittu ja käytetty koerakennuskohteissa jo pitkään. Tuhkaa tutkittiin paljon jo 1970-luvulla ja koerakenteita sekä muita rakennuskohteita on tehty nykypäivään mennessä lukuisia. Betonimurskeen hyödyntämisen tutkiminen maarakentamisessa alkoi Suomessa 1990-luvun alussa ja vuodesta 1994 alkaen on rakennettu monia koerakennuskohteita, joissa materiaalia on käytetty lähinnä tie- ja katurakenteiden kantavassa ja jakavassa kerroksessa [Viatek 1999]. Nykyään betonimurske on jo laajalti käytetty materiaali maarakentamisessa. Tuhka- ja betonimurskekoerakennuskohteista on laadittu lukuisia raportteja ja työohjeita. Varsinkin betonimurskeen hyödyntäminen on viime vuosina ollut kasvussa.

Tämän diplomityön sisältämien pohjatuhkan, lentotuhkan ja betonimurskeen käyttöohjeiden (liitteet 1-3) aineistona on käytetty pääasiassa vuoden 2000 jälkeen julkaistuja suomalaisia työ- ja suunnitteluohjeita sekä Helsingin kaupungin tuhkaprojektin ohjeita 1980-luvulta. Kansainvälistä näkemystä aiheeseen on haettu ulkomaisista ohjeista. Kaikki työssä käytetyt suomalaiset ohjeet ovat julkaistu ennen kesää 2006, jolloin Valtioneuvoston asetus eräiden jätteiden hyödyntämisestä maarakentamisessa astui voimaan. Seuraavat julkaisut ovat toimineet perustana diplomityön sisältämien pohjatuhkan, lentotuhkan ja betonimurskeen käyttöohjeille:

Tuhkarakentamiseen ohjeistavat julkaisut:

”Pohjatuhka 2001” [Helsingin Energia, Viatek Oy 2001] on pohjatuhkarakentamiseen erikoistunut ohje, joka esittää Helsingin Energian hiilipölytuhkan geotekniset ja rakennustekniset ominaisuudet sekä joitakin rakenne-esimerkkejä. Ohje päivitetään todennäköisesti vuoden 2007 aikana.

”Kivihiilituhkan käyttökokemukset kunnallistekniikan maarakenteissa” [Havukainen et al. 1987] on Helsingin kaupungin kiinteistöviraston Tuhkaprojektin loppuraportti, jossa käsitellään lähinnä Helsingissä syntyvää kivihiilituhkaa. Tuhkaprojektin yhteydessä on

julkaisu tekniset ohjeet kivihiilituhkan käytölle maarakentamisessa [Helsingin kaupungin kiinteistövirasto 1983]. Tuhkaprojektin yhteydessä julkaistut raportit ja ohjeet ovat toimineet perustana monelle myöhemmin julkaistulle tuhkaohjeelle.

”Helsingin kaupungin tuhkarakentamisohje” [Helsingin kaupunki 2001] on laaja tuhkaohje, joka on julkaistu vuonna 2001 koekäyttöön. Ohje käsittelee kivihiilen lentotuhkan ja pohjatuhkan geotekniset ja rakennustekniset ominaisuudet sekä esittelee mm. rakenne-esimerkkejä tien- ja kadun tuhkarakenteista suunnittelijalle.

”Tuhkarakentamisohje tie-, katu- ja kenttärakenteisiin” [Finergy 2000] käsittää osat: A Materiaalit, B Suunnittelu ja C Rakentaminen. Ohje on tehty Tuhkat hyötykäyttöön -projektissa. Tuhkarakentamisohje esittelee kivihiilen lentotuhkan ja pohjatuhkan ominaisuudet geotekniseltä, rakennustekniseltä ja suunnittelijan näkökannalta. Ohje sisältää tuhkarakenne-esimerkkejä.

”Tuhkan maarakentamisohje” [Espoon kaupunki, Espoon Sähkö Oy 2000] on Espoon Kaupungin tuhkarakentamisohje ja se on julkaistu vuonna 2000 koekäyttöön. Ohjeessa on käsitelty lentotuhkan ja pohjatuhkan geotekniset ominaisuudet ja ohjeet rakentamiseen sekä suunnitteluun.

Betonimurskerakentamisen ohjeet:

”Betonimurske kadun päällysrakenteessa 2000” [Suomen Kuntaliitto 2000] sisältää osat: suunnitteluohje ja työselustus. Ohje käsittelee betonimurskeen ominaisuudet ja rakentamisen periaatteet. Päällysrakenteen rakenne-esimerkeissä betonimursketta on käytetty kantavassa ja jakavassa kerroksessa. Betonimurskeohje täydentää julkaisua ”Kunnallisteknisten töiden yleinen työselitys 97, KT97”.

”Betonimurskeen käyttö tien päällysrakennekerroksissa” [Tiehallinto 2000] esittelee osassa 1: betonimurskeen geotekniset ominaisuudet, päällysrakenteiden suunnittelun sekä routa- ja kantavuusmitoituksen. Osan 2 sisältö on rakentamisen työselitys.

”Talonrakennuksen maarakenteet” [RIL 132–2000] on yleinen rakennusselostus ja laatuvaatimus noudatettavaksi tavallisissa talo- ja aluerakentamisen maatoissa. Vuoden 2000 painos sisältää perustiedot käytetyimmistä sivutuotteista mukaan lukien betonimurskeet.

3.2 Ohjeiden päivittämisen periaate

3.2.1 Pohjatuhkaohje

Yksinkertaistetut pohjatuhkarakentamisen ohjeet on esitetty liitteessä 1. Käyttöohje on laadittu Lohja Ruduksen toimesta tämän diplomityön yhteydessä ja pääperiaatteena on ollut VNa:n vaatimusten mukaiset ohjeet urakoitsijan ja suunnittelijan käyttöön. Ohjeiden oli tarkoitus olla lyhyet ja selkeät ja siksi yksityiskohtaisempaa tietoa materiaalilla rakentamisesta ja mitoittamisesta etsivien on syytä tutustua lähdekirjallisuuteen.

Ohjeissa pohjatuhkaa on esitetty käytettäväksi lähinnä päällysrakenteen suodatinkerroksessa. Ohjeen rakentamiseen liittyvät työohjeet on koottu kirjallisuudesta. Ympäristökelpoisuus sekä teknilliset vaatimukset ovat VNa:n vaatimusten mukaisia.

3.2.2 Lentotuhkaohje

Lentotuhkaohje (liite 2) on laadittu VNa:n määrittelemän jätteen hyödyntämisen mukaisesti. Yksinkertaistetut ohjeet on tarkoitettu urakoitsijalle ja suunnittelijalle. Lentotuhkaa pidetään yleisesti ottaen vaativana materiaalina rakentaa ja suunnitella. Vaativammissa rakentamiseen ja suunnitteluun liittyvissä asioissa on aina syytä tutkia lähdemateriaalia, jotta varmistetaan laadullisesti hyvä lopputulos. Ohjeessa on esitetty materiaalin ominaisuudet, työohjeita rakentajalle sekä teknisiä vaatimuksia suunnittelijalle.

Lentotuhkaa on ohjeistettu käytettäväksi tien- ja kadun jakavassa kerroksessa. Lujittuvana materiaalina lentotuhkalla on mahdollista rakentaa tien- ja kadun kantava kerros ohuempana kuin luonnonkiviaineksia käytettäessä. Lujittumisen hyödyntäminen suunnittelussa vaatii kuitenkin huolellista rakennustapaa ja mitoittamista suunnitteluohjeiden mukaisesti.

3.2.3 Betoroc-ohje

Betoroc-ohje on esitetty liitteessä 3. Ohjeen perustana ovat VNa:n vaatimukset betonimurskeen hyödyntämiselle ja muut kappaleessa 3.1 mainitut ohjeet. Ohje on tarkoitettu Lohja Ruduksen tuottamalle Betoroc-betonimurskeelle. Betoroc-murskeiden laatuluokat M1, M2, M3 ja M4 ovat vastaavia kuin yleisesti käytettyjen betonimurskeen laatuluokien BeM I, BeM II, BeM III ja BeM IV kanssa.

Ohjeen mukaan toimittaessa voidaan suunnitella ja rakentaa betonimurskerakenteita tien- ja kadun päällysrakenteeseen tai muihin sovelluksiin. Betonimursketta on teknisesti mahdollista käyttää kaikissa alus- ja päällysrakenteen kerroksissa pengertäyhteestä ja suodatinkerroksesta kantavaan kerrokseen asti. Betonimurskeen lujittumisominaisuutta mitoituksessa hyödynnettäessä on syytä tutustua myös muihin betonimurskeohjeisiin.

4. Pohjatuhkakoerakentaminen

4.1 Viikin pohjatuhkakoerakenteet

4.1.1 Yleistä

Helsingin Viikin koekentän rakentamisen tavoitteena oli saada tietoa pohjatuhkan käyttäytymisestä ja rakentamisominaisuuksista. Koekenttärakenteisiin hyötykäytettiin koerakennusluvalla (< 1000 t kuiva-ainesta) yhteensä noin 700 tonnia kolmea pääkaupunkiseudun pohjatuhkatyyppeä. Vantaan Martinlaakson kivihiilivoimalaitoksesta käytettiin hiilipölykattilan pohjatuhkaa ja Espoon Suomenojan voimalaitoksesta hiilipöly- ja leijupetikattilan pohjatuhkaa. Tuhkatyypit on esitetty kuvissa 4.1–4.3. Edellä mainittuja tuhkatyyppejä on jatkossa kutsuttu nimillä Martinlaakson hiilipölytuhka, Suomenojan hiilipölytuhka ja Suomenojan leijupetituhka. Tuhkatyyppejä käytettiin seuraavasti

- Martinlaakson hiilipölytuhka 470 t,
- Suomenojan leijupetituhka 140 t,
- Suomenojan hiilipölytuhkaa 88 t.



Kuva 4.1. Viikki, koerakenteet. Martinlaakson hiilipölytuhka tiivistettynä työmaan koekentällä.



Kuva 4.2. Suomenojan hiilipölytuhkaa varastoituna voimalan pihalle. Vasemman kasan tuhka on vanhaa ja oikealla edellisenä päivänä varastokasalle tuotua ja kosteampaa.

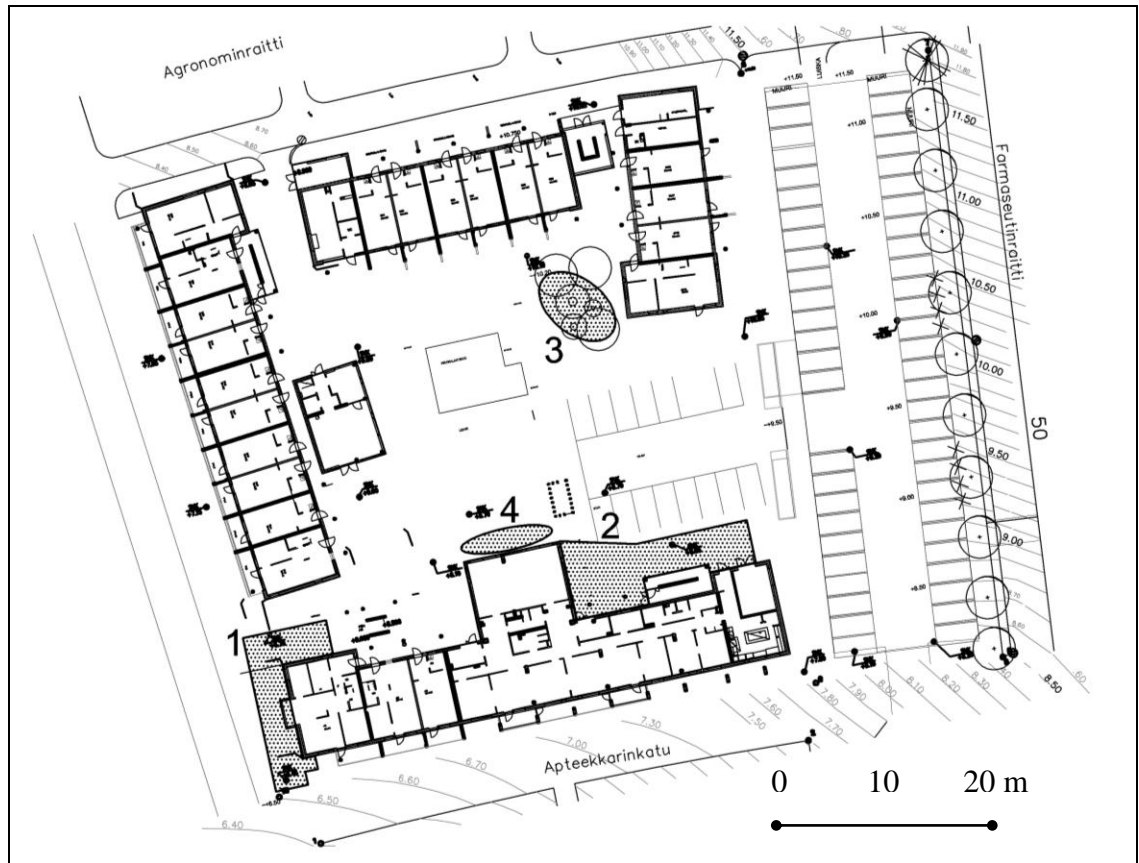


Kuva 4.3. Suomenojan leijupetituhkaa varastoituna voimalaitoksen pihalle.

Pohjatuhkakoekenttä rakennettiin Helsingin Viikkiin, osoitteeseen Apteekkarinkatu 10. Kohde on asuinkerrostalotontti, jossa pohjatuhkakoerakenteet tehtiin talon vierustäyt-
töön, piha-alueen kentälle ja putkikaivantoihin. Tuhkakoekenttien sijainti tontilla on esi-
tetty kuvassa 4.4. Kenttäkokeet on tehty lähes yksinomaan koekentillä 1 ja 2. Kaikki si-
joituskohteet ovat ns. toissijaisia täyttöjä (tiivistysluokka 2), joiden tiiviysastevaatimus
on 92 % [Rantamäki & Tammirinne 2002].

Tuhkanäytteet ennakkokokeita varten haettiin voimalan varastokasalta 15.5.2006. En-
nakkokokeet tehtiin Teknillisen korkeakoulun maalaboratoriossa kesä–elokuun 2006
aikana kaikille kolmelle tuhkatyypille. Ennakkokokeilla pyrittiin saamaan tietoa materi-
aalien ominaisuuksista ja rakennettavuudesta ennen koekentän rakentamista ja rakenta-
misen aikana. Ensimmäiset vesipitoisuustutkimukset osoittivat eri tuhkatyypeistä otetut
osanäytteet hyvin toisiaan vastaaviksi, joten osanäytteet yhdistettiin yhdeksi näytteeksi.

Kenttäkokeet tehtiin työmaan edetessä kesä- ja heinäkuussa 2006. Kenttäkokeiden lisäk-
si työmaalla seurattiin tuhkarakentamisen vaiheita ja pyrittiin havainnoimaan tuhkan
ominaisuuksia rakennusmateriaalina.



Kuva 4.4. Viikki, koerakenteet. Tuhkakoekenttien 1, 2, 3 ja 4 likimääräinen sijainti.

4.1.2 Koerakentaminen

4.1.2.1 Martinlaakson ja Suomenojan voimalaitoksen tuhkat

Martinlaakson ja Suomenojan voimalaitoksen pohjatuhkaa oli varastoituna avokasoihin voimalan pihalle ennen rakentamista ja työmaalle siirtoa. Suomenojan leijupetituhkan varastokasa on esitetty kuvassa 4.5. Tuhka lastattiin autojen lavoilte pyöräkuormaajalla ja tuhkan pinta kasteltiin ajon aikaisen pölyämisen estämiseksi.



Kuva 4.5. Suomenojan leijupetituhka varastoituna avokasaan voimalan pihalle.

4.1.2.2 Koerakentaminen

Viikin koerakentamisen alue rajoittuu pääasiassa asuintalon vierustäyttöön. Tuhkaa käytettiin myös putkien ympärystäytönä, arinarakenteena sekä pihan kenttäalueen alusrakenteeseen. Kaikki koekentän osat ovat likimain samanlaisen pohjamaan päällä. Koekentän pohjamaa on laihaa savea ja sitä on esikuormitettu ennen rakentamista kahden metrin korkuisella esikuormituspenkereellä kolmen vuoden ajan. Pohjamaan päälle oli levitetty noin 0,2 m kerros mursketta tai moreenia riippuen paikasta. Tarkempaa tietoa koerakennusalueen pohjamaasta ei tätä kirjoittaessa ollut saatavilla.

Kuvan 4.4 koekentät 1, 3 ja 4 on rakennettu käyttäen Martinlaakson hiilipölytuhkaa. Koekentässä 2 on käytetty kaikkia kolmea tuhkaa. Kenttäkokeet ja -mittaukset on tehty koekentistä 1 ja 2. Tuhkakoerakenteen kokonaiskerrospaksuus koekentällä 1 vaihteli vä-

lillä 0,3–0,7 m ja koekentällä 2 välillä 1–3,5 m. Kerrospaksuuskäyrästä on esitetty liitteissä 7 ja 8.

Levitystyö tehtiin kaivinkoneen kauhalla ja tiivistäminen 0,8–1,2 m kerroksina hydraulitärtyttimellä tai 0,3–0,4 m kerroksina työnnettävällä tärylevyllä. Yksi rakennekerros tiivistettiin hydraulitärtyttimellä 2–3 ylityskertaa tai kunnes pinta tuntui tiiviiltä ja tärylevy alkoi urakoitsijan mukaan ”pomppimaan”. Työnnettävällä tärtyttimellä tiivistystyö tehtiin 4–5 ylityskerralla.

4.1.2.3 Rakennuskalusto

Koekenttä rakennettiin käyttäen pääasiassa Hitachi telakaivinkonetta (massa 15 t). Tiivistystyö tehtiin kaivinkoneeseen kiinnitettävällä hydraulitärtyttimellä (täryvoima 9000 kg/m²). Pilarien ja putkien ympäristö tiivistettiin työnnettävällä tärylevyllä DPU 5045H (massa 400 kg) tai pienemmällä tärylevyllä DynaPac Lx 90 (massa 90 kg). Myös lapion kädensijaa käytettiin apuna tiivistettäessä putkien välejä. Hydraulitärtytin on esitetty kuvassa 4.6.

Mittavälineinä käytettiin takymetriä, rullamittaa, vaaituskojetta ja tasolaseria.

Tuhka ajettiin työmaalle useimmiten kahdella ajoneuvoyhdistelmällä, jolloin kuormien väliseksi ajaksi tuli 1–1,5 h. Hiilipölytuhkan kokoonpuristuvuus rakenteessa on niin suuri, että rakennustyötä olisi voinut urakoitsijan mielestä tehdä tiheämmälläkin kuormavälillä. Yhden ajoneuvoyhdistelmän kaksi lavaa sisältää noin 30 tonnia hiilipölytuhkaa (noin 27–29 m³ rtr) tai noin 35 tonnia leijupetituhkaa (noin 22–24 m³ rtr).



Kuva 4.6. Viikki, koerakenteet. Kaivinkoneeseen kiinnitettävällä hydraulitärtyttimellä (tärjyvoima 9000 kg/m^2) tiivistettiin osa pohjatuhkarakennekerroksista.

4.1.2.4 Pohjatuhkan rakennettavuus

Hiilipölykattilan pohjatuhka oli voimalan varastokasalta tuotaessa kosteaa verrattuna optimivesipitoisuuteensa. Materiaali ei pölynnyt eikä liettynyt tiivistettäessä. Urakoitsijan mielestä materiaalin kivettömyys helpottaa rakentamista ja säästää työkoneita.

Leijupetituhka oli työmaalle tuotaessa kuivempaa kuin sille määritetty optimivesipitoisuus. Tuhka ei pölyä, koska hienoaainesta on vähän. Vedenläpäisevyys on hyvä, eikä materiaali siksi liety vaikka tiivistystyö tehtäisiin hyvinkin märkänä.

4.1.3 Kenttäkokeiden suorittaminen

4.1.3.1 Vesipitoisuuden määrittäminen

Työmaalle tulleista tuhkakuormista määritettiin vesipitoisuus laboratorioissa. Näytteet olivat noin litran suuruisia ja ne otettiin muovipusseihin, jotka suljettiin tiiviisti. Vesipitoisuusnäytteitä otettiin kolme jokaista tuhkatyyppiä kohden ja näytteet pyrittiin ottamaan eri puolilta kasaa ja eri kuormista.

4.1.3.2 Tiivistymisen mittaus

Tiivistämättömän tuhkakerroksen tiivistymistä hydraulitärytyksessä mitattiin vaaituskojeella ja rullamitalla ennen ja jälkeen tiivistyksen. Tiivistymismittauksia tehtiin Martinlaakson hiilipölytuhkalle ja Suomenojan leijupetituhkalle.

Työnnettävän tärylevyn ja hydraulitäryttimen tiivistystehokkuutta vertailtiin Martinlaakson hiilipölytuhkarakenteella. Saman rakenteen korot mitattiin ensin tärylevyllä tiivistetystä pinnasta sekä myöhemmin hydraulitärytetystä pinnasta ja tarkasteltiin, kummalla menetelmällä pinnan korot olivat alempana.

4.1.3.3 Tilavuuspaino

Sylinterinäytteet

Eri tuhkatyyppien tilavuuspainoja määritettiin tiivistettyyn rakenteeseen painettavilla metallisylintereillä, joiden seinämäpaksuus oli 2 mm, halkaisija 98 mm ja korkeus 200 mm. Alareunastaan teroitettut sylinterit painettiin rakenteeseen kaivinkoneen kauhalla ja näytteet kaivettiin ylös mahdollisimman häiriintymättöminä. Näyteputkien päädyt suljettiin muovitulpilla.

Laboratoriossa näytekappaleen tilavuus mitattiin työntömitalla ja massa punnittiin sekä märkänä että kuivana. Kuiva- ja märkätilavuuspaino laskettiin näytteen massan suhteena tilavuuteen.

Tilavuuspainojen tutkiminen metallisylintereillä oli tilapäisratkaisu, koska toimintakuntoista vesivolymetriä ei ko. kerroksia tehtäessä ollut saatavilla.

Vesivolymetri

Martinlaakson hiilipölytuhkalle tehtiin vesivolymetrillä tilavuuspainomäärittäyksiä tiivistetyltä pinnalta. Volymetrinä käytettiin Teknillisen korkeakoulun mittalaitetta.

Mittaus suoritettiin valitsemalla homogeenisesti ja edustavasti tiivistynyt kohta tuhkarakenteesta. Vesivolymetri asetettiin maahan tiukasti ja painettiin männästä kunnes painemittari näytti 0,3 bar. Lukema kirjattiin ylös mittauspöytäkirjaan. Samasta kohdasta kaivettiin noin litran kokoinen näyte muovipussiin ja suljettiin huolellisesti. Vesivolymetri asetettiin vastakaivettuun, häiriintymättömään kuoppaan ja painettiin männästä kunnes painemittari näytti 0,3 bar. Kuiva- ja märkätilavuuspaino saatiin laskemalla näytteen massan suhde tilavuuksien erotukseen.

4.1.3.4 Kantavuus

Tuhkakerrokset kantavuusominaisuuksia mitattiin heavy loadman-pudotuspainokokeella Maateknikka Oy:n toimesta. Heavy loadman on auton peräkärriin sijoitettu kuormituslaitteisto, joka mittaa saman mittapisteen kantavuuden kahdesti (E_1 ja E_2). Kuormituspuntin massa on 25 kg ja kuormituslevyn halkaisija 300 mm. Ensimmäisen ja toisen kuormituksen suhde, E_2/E_1 kuvaa maakerroksen tiivistymisen tehokkuutta.

Heavy loadmanilla mitatut kantavuusarvot (E_2) voidaan muuntaa levykuormituskokeita vastaaviksi kaavan 4.1 [Tielaitos 1994] avulla.

$$E_2 = 0,87 \cdot E_p \quad (4.1)$$

jossa E_2 on levykuormituskokeen kantavuuslukema E_2 ja

E_p heavy loadmanilla mitattu tulos.

4.1.4 Kenttäkokeiden tulosten analysointi

4.1.4.1 Vesipitoisuus

Työmaalla käytetyn tuhkan vesipitoisuus vastasi melko hyvin ennakkokokeissa määritettyjä vesipitoisuuden arvoja. Saadut tulokset on esitetty taulukossa 4.1.

Taulukko 4.1. Viikki, koerakenteet. Työmaalta otettujen vesipitoisuusnäytteiden tulokset.

Tuhkanäyte nro.	Martinlaakson hiilipölytuhka [%]	Suomenojan hiilipölytuhka [%]	Suomenojan leijupetituhka [%]
1	33,8	36,5	8,2
2	35,3	38,6	8,3
3	32,0	54,2	9,3
Keskiarvo	33,7	43,1	8,6

Keskiarvoja verrattaessa ennakkokokeilla saatuihin tuloksiin voidaan havaita, että Suomenojan hiilipölytuhkan vesipitoisuus on pienempi työmaalla käytetyssä tuhkassa. Suomenojan hiilipölytuhkanäyte nro. 3 on otettu eri auton tuomasta tuhkasta kuin kaksi muuta näytettä. Tuloksista voidaan havaita, että tuhkan vesipitoisuus voi vaihdella paljon riippuen siitä, mistä kohdasta kasaa kyseinen tuhka on voimalan pihalta otettu.

4.1.4.2 Tiivistymisen mittaus

Tuhkakerroksen tiivistymiseen vaikutti paljon se, oliko tuhka ennen tiivistystä vain levitetty tasaiseksi, paineltu kauhalla vai yliajettu kaivinkoneella tai kuorma-autolla.

Tiivistymistä kuvaavat mittaustulokset on esitetty taulukoissa 4.2, 4.3 ja 4.4. Alapinnan korot on määritetty takymetrillä.

Martinlaakson hiilipölytuhkarakennetta ei voitu kokonaan täryttää hydraulitäryttimellä, koska vastavalettuja parvekerakenteita oli tuettu ko. tuhkakentän pintaan. Tästä syystä kaikkia mittaustuloksia ei saatu.

Suomenojan leijupetituhka oli tiivistetty kahdessa kerroksessa. Alempi oli ohuempi kerros ja sillä tasattiin epätasainen pohjamaa. Suomenojan leijupetituhkarakenteen korkomittauksissa on mahdollisesti sattunut kaksi mittavirhettä, sillä tärytetyn pinnan korot ovat kahdessa tapauksessa olleet ylempänä kuin tiivistämättömässä. Mittausalusta tasoitettiin mahdollisista tärytyksen saumajäljistä ennen lukeman ottamista. Taulukon 4.4 kokoonpuristuman ja löyhän kerrospaksuuden suhde on esitetty kuvaajana kuvassa 4.7.

Taulukko 4.2. Viikki, koerakenteet. Martinlaakson hiilipölytuhkan vaaituskojemittaukset korkoina tuhkakoealentä 1 ja kokoonpuristuma.

Mittapiste	Alapinta	Yläpinta tiivistettynä tärylevyllä (400 kg)	Yläpinta tiivistettynä hyd- raulitäryttimellä	Painuma [m]	Kokoonpuristuma [%]	Kerrospaksuus tiivistettynä tärylevyllä [m]
mh1	+6,00	+6,50	+6,43	0,07	14	0,50
mh3	+5,60	+6,22	+6,21	0,01	2	0,62
mh6	+5,50	+6,36	+6,25	0,11	13	0,86
mh7	+6,00	+6,49	+6,45	0,04	8	0,49

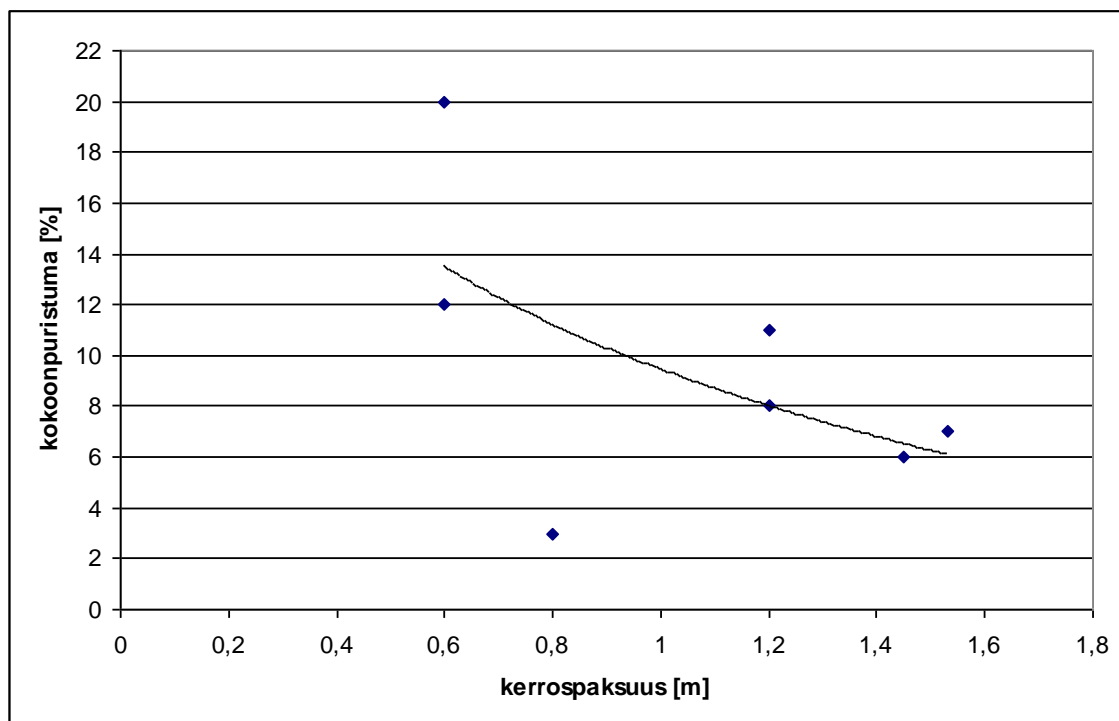
Taulukko 4.3. Viikki, koerakenteet. Suomenojan leijupetituhkan vaaituskojemittaukset korkoina tuhkakoealentä 2 ja kokoonpuristuma.

Mittapiste	Alapinta	Yläpinta ennen tiivistystä	Yläpinta tiivistet- tynä hydraulitäryt- timellä	Painuma [m]	Kokoonpu- ristuma [%]	Kerrospak- suus löyhänä [m]
m1	+5,53	+6,81	+6,82	-0,01 *	-1	1,28
m2	+6,05	+6,93	+6,89	0,04	5	0,88
m3	+6,30	+6,95	+6,97	-0,02 *	-3	0,65
m4	+5,38	+6,98	+6,89	0,09	6	1,60
m5	+6,75	+7,07	+7,05	0,02	6	0,32
m6	+5,95	+7,04	+6,96	0,08	7	1,09

* mittausvirhe

Taulukko 4.4. Viikki, koerakenteet. Martinlaakson hiilipölytuhkan painumamittaukset rullamitalla mitattuna tuhkakoe kentältä 2 ja kokoonpuristuma.

Mittapiste	Painuma [m]	Kokoonpuristuma [%]	Kerrospaksuus löyhänä [m]
1	0,07	12	0,60
2	0,12	20	0,60
3	0,09	8	1,20
4	0,13	11	1,20
5	0,02	3	0,80
6	0,10	7	1,53
7	0,08	6	1,45



Kuva 4.7. Viikki, koerakenteet. Martinlaakson hiilipölytuhkan kokoonpuristuvuuden suhde kerrospaksuuteen.

4.1.4.3 Tilavuuspaino

Sylinterinäytteistä mitatut ja vesivolymetrillä määritetyt pohjatuhkan tilavuuspainot on esitetty liitteessä 9.

Martinlaakson hiilipölytuhkalle vesivolymetrillä tehdyt mittaukset antoivat suuremmat tilavuuspainot kuin sylinterinäytteillä saadut.

Kenttäkokeilla mitatut tilavuuspainon arvot olivat pienempiä kuin Lohja Ruduksen teettämät, ICT-kiertotiivistyslaitteella saadut tulokset (liite 13). Myös Helsingin Energian pohjatuhkaohjeen [Viatek 2001] ilmoittamat, suunnittelussa käytettävät hiilipölykattilan pohjatuhkan tilavuuspainot olivat suurempia kuin kenttäkokeilla mitatut arvot.

Kenttäkokeilla mitatut kuivatilavuuspainot voidaan muuntaa tiiviysasteeksi vertaamalla saatuja tuloksia parannetulla proctor-sullonnalla saatuun maksimikuivatilavuuspainoon kaavan 4.2 mukaisesti.

$$D = \frac{\gamma_d}{\gamma_{d \max}} \cdot 100\%, \quad (4.2)$$

jossa D on tiiviysaste eli sullonta-aste

γ_d kuivatilavuuspaino kenttäkokeissa

$\gamma_{d \max}$ maksimikuivatilavuuspaino.

Tiiviysasteet on esitetty taulukossa 4.5. Taulukon 4.5 tiiviysasteista voidaan todeta työmaalla tapahtuneen tiivistämisen jääneen tiiviysastetavoitteesta $D \geq 92 \%$. Toisaalta pudotuspainokokeiden kantavuussuhteet osoittavat tiivistyksen olleen riittävä.

Taulukko 4.5. Viikin koerakenteet. Pohjatuhkan tiiviysaste laskettuna kenttäkokeiden ja proctor-sullonnan suhteesta sekä kenttäkokeiden kuivatilavuupainojen keskiarvot.

	Martinlaakson hiilipölytuhka	Suomenojan hiilipölytuhka	Suomenojan leijupetituhka
Kenttäkokeiden ka. kuivatilavuuspaino	8,8 kN/m ³	7,1 kN/m ³	13,6 kN/m ³
Maksimi kuivatilavuuspaino parannetulla proctor-sullonnalla	10,7 kN/m ³	10,0 kN/m ³	15,4 kN/m ³
Tiiviysaste	81,7 %	70,6 %	88,2 %

4.1.4.4 Kantavuus

Tuhkakoe kenttien pudotuspainokokeidentulokset on esitetty taulukossa 4.6.

Taulukko 4.6. Viikin koerakenteet. Heavy loadman pudotuspainolaitteella mitatut kantavuudet ja kantavuussuhteet sekä E_2 muunnettuna levykuormituskoetta vastaavaksi Martinlaakson hiilipölytuhkalle (a), Suomenojan hiilipölytuhkalle (b) ja Suomenojan leijupetituhkalle (c).

a)	Koe nro.	E_1 [MN/m ²]	E_2 [MN/m ²]	E_2 / E_1	Levykuormituskoetta vastaava E_2 [MN/m ²]
Martinlaakson hiilipölytuhka	8	81	89	1,10	77
	9	76	84	1,11	73
	10	78	84	1,08	73
Keskiarvo		78	86	1,10	74

b)	Koe nro.	E_1 [MN/m ²]	E_2 [MN/m ²]	E_2 / E_1	Levykuormituskoetta vastaava E_2 [MN/m ²]
Suomenojan hiilipölytuhka	4	79	85	1,08	74
	5	80	92	1,15	80
	6	78	92	1,18	80
	7	84	93	1,11	81
Keskiarvo		80	91	1,13	79

c)	Koe nro.	E_1 [MN/m ²]	E_2 [MN/m ²]	E_2 / E_1	Levykuormituskoetta vastaava E_2 [MN/m ²]
Suomenojan leijupetituhka	1	81	88	1,09	77
	2	80	89	1,11	77
	3	81	86	1,06	75
Keskiarvo		81	88	1,09	76

Kantavuusmittausten suhdeluku E_2/E_1 on kaikissa mittapisteissä reilusti alle yleisen vaatimuksen $\leq 2,2$. Hyvä kantavuus viittaisi rakenteen hyvään tiiveyteen, toisin kuin tiiveysmittaukset taulukossa 4.5 osoittivat.

Liitteessä 10 on esitetty tarkemman tiedot pudotuspainokokeiden kerrospaksuuksista, tiivistyskerroista, pohjamaan laadusta sekä laskettu tuhkan kantavuusmoduuli eli takaisinlaskettu E_2 .

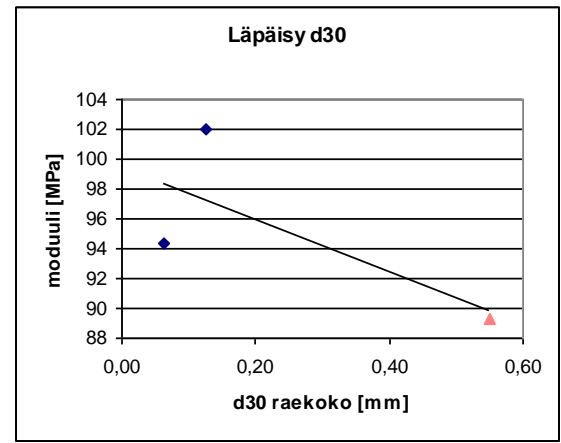
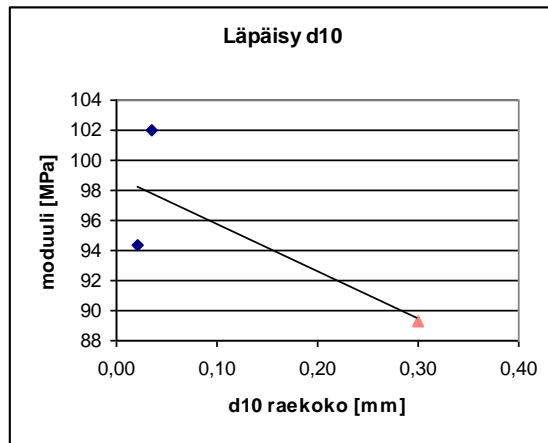
Martinlaakson hiilipölytuhkan, Suomenojan hiilipölytuhkan ja Suomenojan leijupetituhkan kantavuuden ja raekoon yhteyttä selvitettiin piirtämällä kuvaajat erisuurien läpäisyprosenttien ja kantavuusmoduulien (takaisinlaskettu E_2) välille. Vähäisen otannan ja eroavien materiaalien takia rakeisuuden ja kantavuuden yhteydestä (kuvat 4.8–4.10) kannattaa tehdä vain varovaisia päätelmiä. Taulukossa 4.7 on esitetty rakeisuuden tunnusluvut.

Kuvista 4.8 ja 4.9 voidaan todeta, että läpäisyprosentteja d_{10} , d_{30} , d_{50} ja d_{60} edustavien raekokojen pienetessä pohjatuhkan moduuli kasvaa.

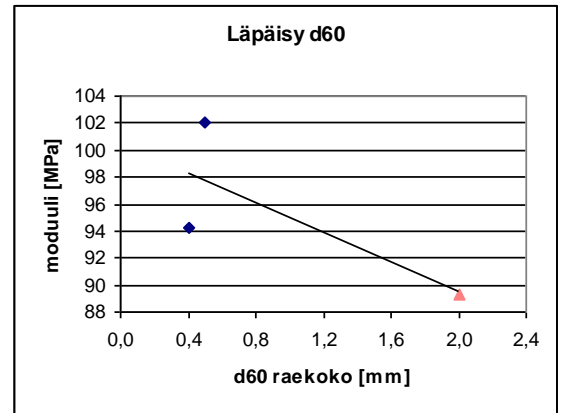
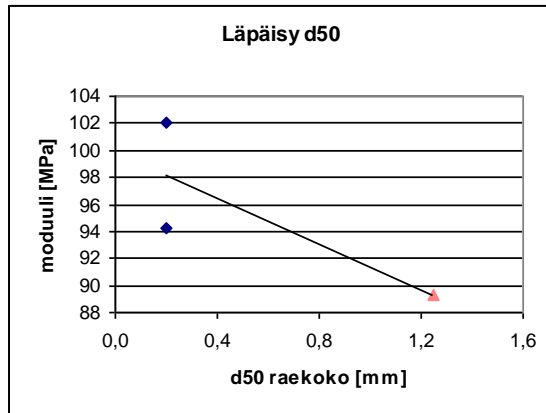
Rakeisuuden tunnusluvut d_{10} , d_{30} , d_{50} ja d_{60} kuvaavat rakeisuuskäyrän läpäisyprosenttia vastaavaa raekokoa (mm).

Raekokosuhde eli yhdenmuotoisuuskerroin kuvaa materiaalin raekokojakauman suhdetta. Maalaji on tasarakeinen jos sen raekokosuhde $C_u \leq 5$, sekarakeinen $C_u > 5 \dots 15$ ja suhteistunut $C_u > 15$. [Rantamäki et al. 1992].

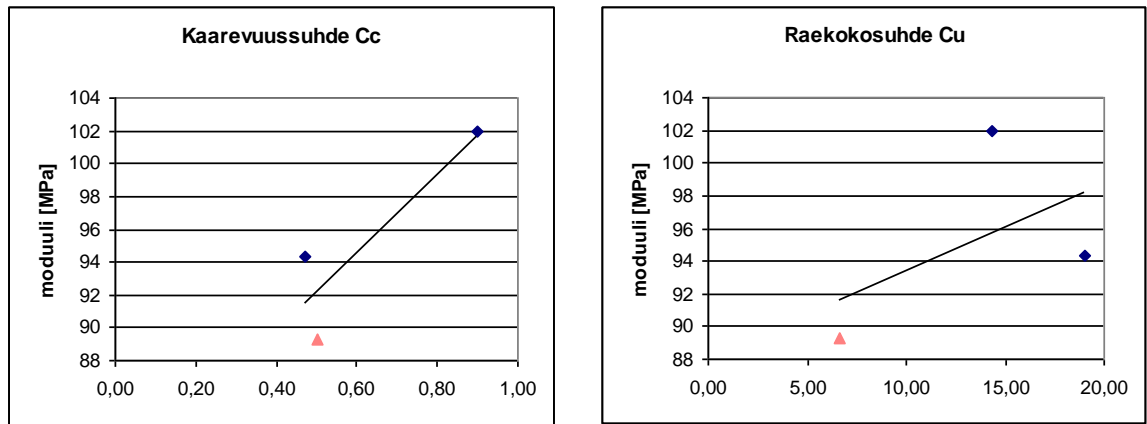
Kaarevuussuhde kuvaa rakeisuuskäyrän muotoa. Kaarevuussuhde on kuitenkin kehitetty luonnon kiviaineksille tienrakennusmateriaalina, joten soveltuvuutta pohjatuhkan ominaisuuksien arvioimiseen on arvioitava kriittisesti [SCC Viatek Oy 2004].



Kuva 4.8. Viikki, koerakenteet. Pohjatuhkan kantavuusmoduulin riippuvuus läpäisyprosenttia d_{10} ja d_{30} edustavasta raekoosta. Neliöllä on merkitty hiilipölytuhkat ja kolmiolla leijupetituhka.



Kuva 4.9. Viikki, koerakenteet. Pohjatuhkan kantavuusmoduulin riippuvuus läpäisyprosenttia d_{50} ja d_{60} edustavasta raekoosta. Neliöllä on merkitty hiilipölytuhkat ja kolmiolla leijupetituhka.



Kuva 4.10. Viikki, koerakenteet. Pohjatuhkan kantavuusmoduulin riippuvuus kaarevuussuhteesta C_c ja raekokosuhteesta C_u . Neliöllä on merkitty hiilipölytuhkat ja kolmiolla leijupetituhka.

Taulukko 4.7. Viikki, koerakenteet. Rakeisuuden tunnusluvut.

Rakeisuuden tunnusluvut	Martinlaakson hiilipölytuhka	Suomenojan hiilipölytuhka	Suomenojan leijupetituhka
Läpäisy d_{10} [mm]	0,03	0,02	0,3
Läpäisy d_{30} [mm]	0,13	0,06	0,6
Läpäisy d_{50} [mm]	0,2	0,2	1,3
Läpäisy d_{60} [mm]	0,5	0,4	2,0
Raekokosuhde $C_u = d_{60} - d_{10}$	14,4	19,1	6,7
Kaarevuussuhde $C_c = d_{30}^2 / (d_{10} * d_{60})$	0,90	0,47	0,50

4.2 Hyvinkään koerakenteet

4.2.1 Yleistä

Hyvinkään Kiertokapulan jätteenkäsittelyalueelle rakennettiin Martinlaakson hiilipölykattilan pohjatuhkasta kaksi koerakennetta, toinen suoraan jätetäytön päälle ja toinen betonimurskekentälle, joka on rakennettu jätetäytön päälle. Koerakenteista mitattiin kantavuutta eri vesipitoisuuksilla ja tiivistystyön määrällä. Märän pohjatuhkan rakenta-

misominaisuuksia seurattiin, kun vesipitoisuus oli lähellä liettymisrajaa. Kenttäkokeet tehtiin 10.10.2006. Koekentän sijainti on esitetty nuolilla kuvassa 4.11.



Kuva 4.11. Hyvinkään pohjatuhkakoekenttien sijainti esitettynä nuolilla Kiertokapulan jätteenkäsittelyalueella [Kiertokapula Oy 2007].

4.2.2 Koerakenteet

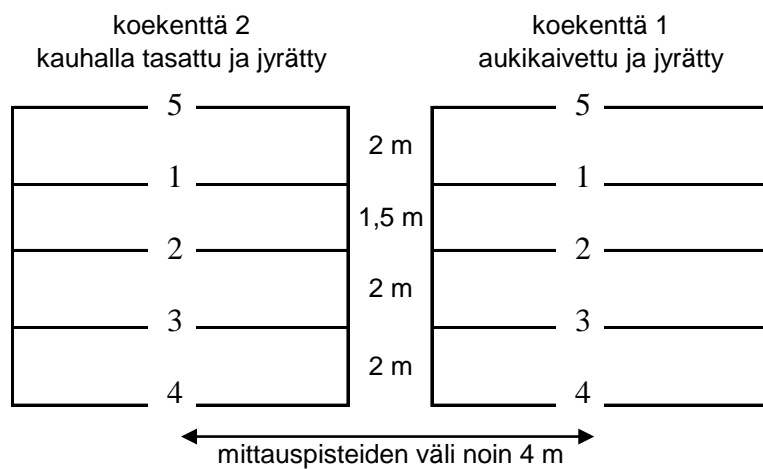
Martinlaakson pohjatuhka tuotiin koekentälle 28.9.–2.10.2006 välisenä aikana. Jätetäytön päälle koerakenne rakennettiin ja muotoiltiin 28.9.2006.

Pohjatuhkakoekentän rakentamiseen käytettiin traktorikaivuria ja tiivistämiseen työnnettävää tärylevyä (BpR 30/28 D-3, massa 263 kg). Pohjatuhka tuotiin työmaalle kuorma-autoilla ja kasteluun käytettiin säiliöautoa. Rakennustyökoneet on esitetty kuvassa 4.12.

Jätetäytön päälle tehdyn koerakenteen mitat ja mittauspisteet on esitetty kuvassa 4.13. Koekentällä 1 kaivettiin 28.9.2006 levitettyä tuhkarakennetta auki ja tarkastettiin pohjamaan laatu ja kantavuus (kuva 4.13). Pohjamaa oli moreenikerros (< 20 cm), joka oli levitetty sekajätteen päälle. Jätetäyttö ja moreeni oli tiivistetty Tana-sorkkajyrällä (massa 40 t). Koekenttä 2 sijaitsi koekentän 1 vieressä ja pohjaolosuhteet oletettiin samoiksi.



Kuva 4.12. Hyvinkään pohjatuhkakoe kentän rakennustyökoneet koerakenteen päällä
[Kuva: Petri Ilama / Lohja Rudus Oy].



Kuva 4.13. Jätetäytön päällä koerakennekentällä tehtiin viisi kantavuusmittausta kahdella eri tiivistysmäärällä koekentillä 1 ja 2.

Koekenttä 1 rakennettiin auki kaivetusta massoista ja tärytiivistys tehtiin tiivistämättömälle pinnalle. Koekenttä 1 on esitetty kuvassa 4.14.

Koekentän 2 pinta oli levitetty ja tasattu kaivinkoneen kauhalla 28.9.2006. Tiivistystyö tehtiin työnnettävällä tärylevyllä.

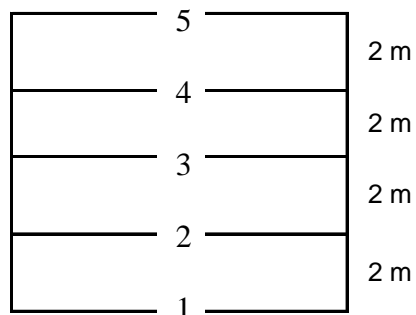
Koekenttä 3 rakennettiin betonimurske- ja betonimurskesorakentälle. Koekentän mittapisteen 1 ja 2 olivat betonimurskekentällä ja muut pisteet betonimurskesorakentän päällä. Koekentän rakenne ja mittapisteen on esitetty kuvassa 4.15.

Hyvinkään koerakentamiskohteen koekenttien perustiedot on esitetty taulukossa 4.8.



Kuva 4.14. Hyvinkään koekenttä 1 rakennettiin auki kaivetusta pohjatuhkasta jätetäytön ja moreenikerroksen päälle [Kuva: Petri Ilama / Lohja Rudus Oy].

koekenttä 3
kauhalla liipattu ja jyrätty



Kuva 4.15. Hyvinkään koekenttä 3 tehtiin betonimurske- ja betonimurskesorakentän päälle.

Taulukko 4.8. Hyvinkään koekenttä. Martinlaakson hiilipölytuhkasta rakennettujen koekenttien 1, 2 ja 3 perustiedot.

Koekenttä	Materiaali	Pohjamaa	Rakennustapa
Koekenttä 1	auki kaivettu pohjatuhka	jäte	aukikaivetusta pohjatuhkasta rakentaminen ja tiivistäminen
Koekenttä 2	levitetty pohjatuhka	jäte	levitetyn pohjatuhkan tiivistäminen rakenteeseen
Koekenttä 3	kasavarastoitu pohjatuhka	betonimurske (BeM), betonimurskesora (BeM Sr)	kasavarastoidusta pohjatuhkasta rakentaminen ja tiivistäminen

4.2.3 Kenttäkokeet

4.1.4.5 Vesipitoisuus

Ennakkokokeina (5.10.2006) otettiin vesipitoisuusnäytteet jätetäytön yläpuolisesta pohjatuhkakoerakenteesta. Pinta oli tasattu ja pinnan päällä oli ajettu raskailla ajoneuvoilla. Vesipitoisuusmääritysten keskiarvo on $w = 39,8 \%$. Mittaustulokset on esitetty taulukossa 4.9.

Kenttäkoepisteistä otetut vesipitoisuusnäytteet otettiin 10.10.2006. Vesipitoisuudeksi mitattiin keskiarvo $w = 33,1 \%$. Mittaustulokset ja mittapisteen kuvaus on esitetty taulukossa 4.10.

Taulukko 4.9. Hyvinkään koekenttä. Jätetäytön päältä koerakenteesta otettujen näytteiden vesipitoisuudet.

Näytenumero	Vesipitoisuus [%]	Mittapisteen kuvaus
W1	44,3	tasattu pinta
W2	41,8	yliajettu ja tiivistynyt pinta
W3	33,4	tasattu pinta

Taulukko 4.10. Hyvinkään koekenttä. Loadman-mittauspisteistä otettujen näytteiden vesipitoisuudet.

Näytenumero	Vesipitoisuus [%]	Mittapisteen kuvaus
WJ1	31,2	koekenttä 1 piste 1, jyrätty 6 kertaa
WJ2	30,7	koekenttä 1 piste 2, jyrätty 6 kertaa
WJ3	34,7	koekenttä 1 piste 3, jyrätty 6 kertaa
WW4	39,7	koekenttä 2 piste 4, jyrätty 6 kertaa + lisätty vettä + jyrätty 2 kertaa
WB2	35,8	koekenttä 3 piste 2, jyrätty 6 kertaa (pinta liettynyt vetiseksi)

4.1.4.6 Martinlaakson hiilipölytuhkan kantavuus

Martinlaakson hiilipölytuhkan kantavuusmittaukset tehtiin kannettavalla Loadman 1 pudotuspainolaitteella. Mittalaitteen sisällä oleva paino pudotetaan nappia painamalla ja mittaustulos voidaan lukea LCD-näytöltä. Loadman 1:n pohjalevyn halkaisija on 132 mm, pudotuspainon massa 10 kg ja pudotuskorkeus 80 cm.

Kantavuusmittaus tehtiin mittaamalla jokaisesta mittapistestä ensin E_1 -lukema ja tämän jälkeen samasta pisteestä 4-5 kertaa E_2 -lukema. E_2 -lukemista laskettiin keskiarvo E_{2ka} ja kantavuussuhde E_{2ka}/E_1 .

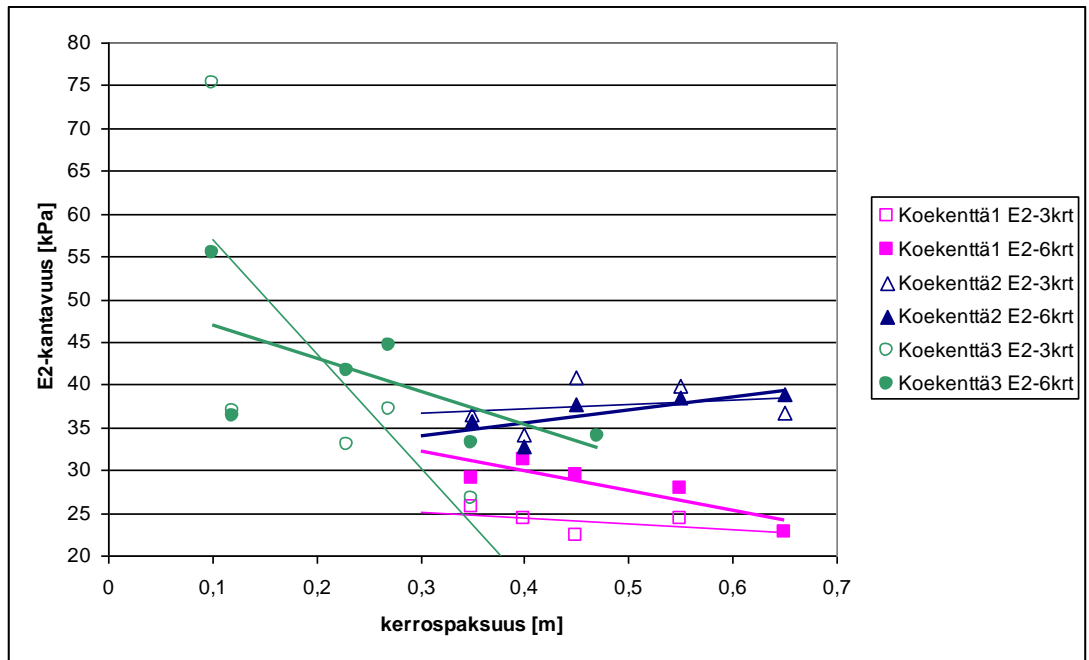
Tiivistetyn rakennekerroksen paksuus vaihteli koekentillä 1 ja 2 välillä 0,35–0,65 m ja koekentällä 3 välillä 0,1–0,35 m.

Kantavuusmittaukset tehtiin kaikilla koekentillä kolmella ja kuudella tiivistyskerralla viidestä eri pisteestä, joilla oli erisuuret kerrospaksuudet. Mittaustulokset on esitetty yhteenvedona liitteessä 11.

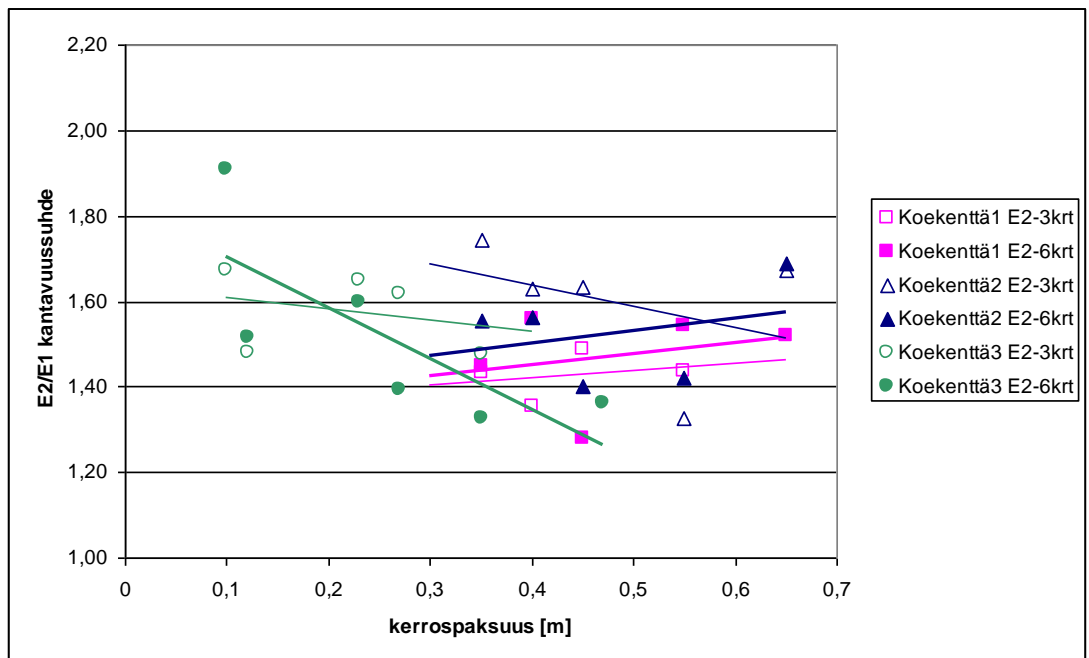
E_2 -kantavuus kerrospaksuuden funktiona kolmella ja kuudella tiivistyskerralla on esitetty kuvassa 4.16. Kantavuussuhde E_{2ka}/E_1 kerrospaksuuden funktiona kolmella ja kuudella tiivistyskerralla on esitetty kuvassa 4.17.

Lisäksi jätetäytön päällä tiivistetty koerakenne kasteltiin runsaalla vedellä ja jyrättiin vielä kahteen kertaan. Kastellusta mittapisteestä 4 otetut kantavuuslukemat eivät poikenneet oleellisesti kastelemattomasta, pisteestä 4 otetuista kantavuustuloksista.

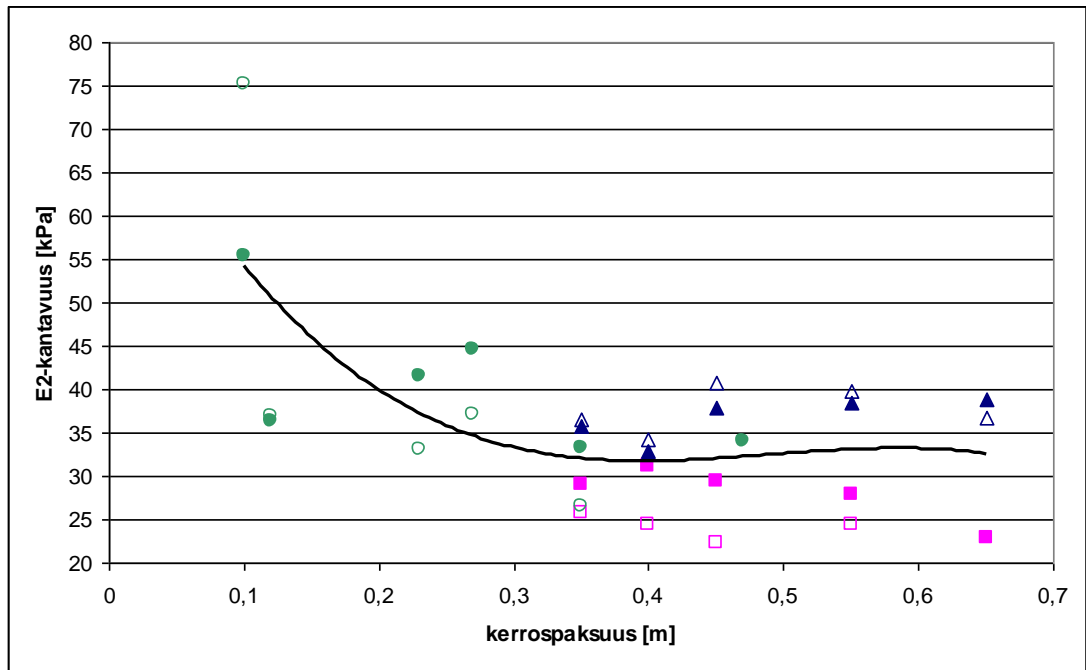
Koekenttien 1, 2 ja 3 E_2 -kantavuus kerrospaksuuden funktiona on esitetty kuvassa 4.18. Kantavuussuhde E_{2ka}/E_1 kerrospaksuuden funktiona on esitetty kuvassa 4.19.



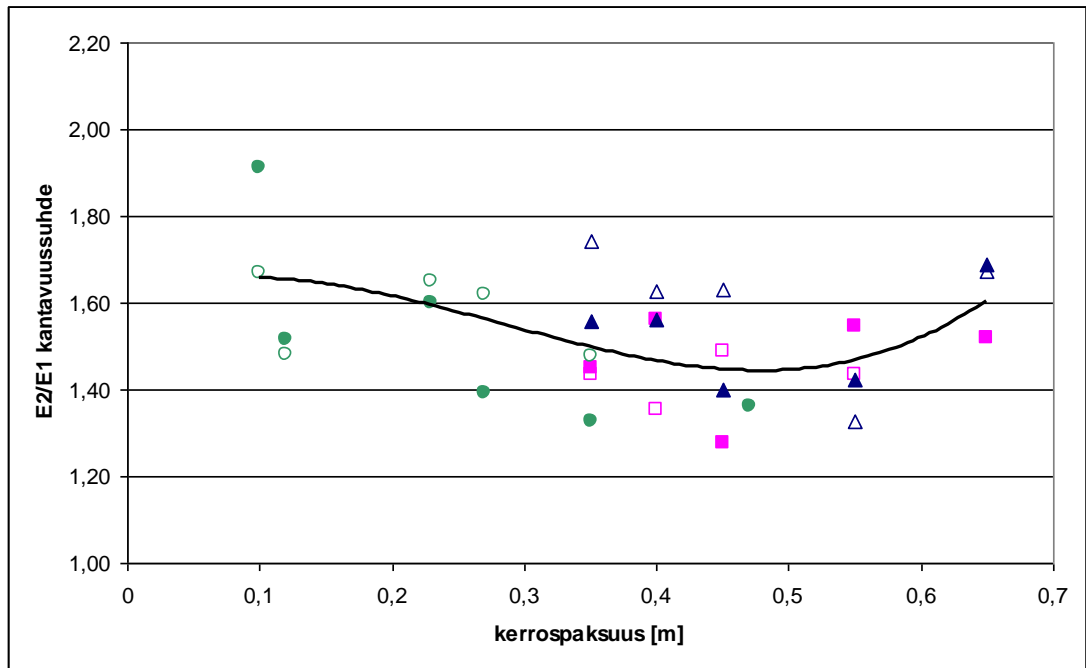
Kuva 4.16. Hyvinkään koekenttä. E_2 -kantavuus kerrospaksuuden funktiona kolmella ja kuudella tiivistyskerralla.



Kuva 4.17. Hyvinkään koekenttä. Kantavuussuhde E_{2ka}/E_1 kerrospaksuuden funktiona kolmella ja kuudella tiivistyskerralla.



Kuva 4.18. Hyvinkään koekenttä. Koekenttien 1, 2 ja 3 E_2 -kantavuus kerrospaksuuden funktiona esitettynä epälineaarisella sovituskäyrällä.



Kuva 4.19. Hyvinkään koekenttä. Koekenttien 1, 2 ja 3 kantavuussuhde E_2/E_1 kerrospaksuuden funktiona esitettynä epälineaarisella sovituskäyrällä.

Martinlaakson hiilipölytuhkan ja pohjamaan kantavuusmittauksista määritettiin pohjatuhkan E-moduuli takaisinlaskennalla Odemarkin menetelmällä (kaava 4.3) [Tiehallinto 2004].

$$E_Y = \frac{E_A}{\left(1 - \frac{1}{\sqrt{1 + 0,81 \cdot \left(\frac{h}{0,15}\right)^2}}\right) \cdot \frac{E_A}{E} + \frac{1}{\sqrt{1 + 0,81 \cdot \left(\frac{h}{0,15}\right)^2 \cdot \left(\frac{E}{E_A}\right)^{2/3}}}} \quad (4.3),$$

jossa E_Y on mitoitettavan kerroksen päältä saavutettava kantavuus (MPa),

E_A mitoitettavan kerroksen alta saavutettava kantavuus (MPa),

E mitoitettavan kerroksen materiaalin E-moduuli (MPa),

h mitoitettavan kerroksen paksuus (m).

Koekenttien 1, 2 ja 3 E-moduulien keskiarvot on esitetty taulukossa 4.11. Martinlaakson hiilipölytuhkan E-moduuliksi voidaan edellä mainittujen keskiarvojen perusteella todeta olevan 39 MPa.

Taulukko 4.11. Odemarkin menetelmällä Martinlaakson hiilipölytuhkalle takaisinlasketut E-moduulit (E_2 -kantavuudesta).

Alue	E-moduuli [MPa]	Kerrospaksuus [m]
Koekenttä 1	36	0,35–0,65
Koekenttä 2	59	0,35–0,65
Koekenttä 3	22	0,10–0,47
Keskiarvo	39	

E-moduulin takaisinlaskenta Odemarkin menetelmällä on esitetty liitteessä 12.

4.2.4 Yhteenveto mittaustuloksista

Kantavuusmittaustuloksissa on jonkin verran hajontaa, johtuen mm. jätetäytön epähomogeenisesta koostumuksesta. Loadman-mittalaitteen mittaustulosten hajonta pyrittiin eliminoimaan usealla E_2 -kantavuusmittauksella.

Pohjatuhkaa suositellaan levitettävän enintään 30–40 cm paksuina kerroksina kerrallaan [Helsingin Energia, Viatek Oy 2001], joten kantavuusmittaustuloksia tarkasteltaessa on syytä huomioida ohjeistetut kerrospaksuuksia koskevat työtavat.

Kuvan 4.16 kantavuuden ja kerrospaksuuden suhteesta voidaan todeta, että:

- koekentän 1 tiivistäminen kuudella yliajo kerralla parantaa kantavuutta varsinkin ohuemmilla kerrospaksuuksilla (0,35–0,45 m) verrattaessa kolmella yliajokerralla tiivistettyyn
- koekentän 2 kantavuudet ovat parempia kuin koekentän 1 tulokset, johtuen raskaiden ajoneuvojen yliajon aiheuttamasta tuhkan tiivistymisestä
- koekentällä 2 lisätiivistys (3 → 6 yliajokertaa) ei parantanut kantavuutta kerrospaksuuksilla 0,35–0,55 m

koekentän 3 lisätiivistys (3 → 6 yliajokertaa) parantaa rakenteen kantavuutta kerrospaksuuksilla 0,20–0,35 m. Ohuemmilla kerroksilla kuuteen kertaan tiivistäminen löyhdyttää rakennetta verrattuna kolmella yliajokerralla tiivistettyyn.

5. Martinlaakson ja Suomenojan voimalaitoksen pohjatuhkan laboratorikokeet

5.1 Laboratorikokeiden suoritus

5.1.1 Areometri ja kuivaseulonta

Hiilipölytuhkan rakeisuusmääritykset tehtiin pääasiassa areometrimenetelmän ja kuivaseulonnan yhdistelmällä. Leijupetituhkan rakeisuusmääritys tehtiin kuivaseulontalaitteistolla. Suomenojan hiilipölytuhkanäyte tutkittiin tavanomaisen koostumuksen lisäksi parannetun proctor-kokeen jälkeen murskautuneena.

Areometri

Hienompijakoisten maalajien rakeisuuden määrittäminen voidaan suorittaa areometrimenetelmällä, jossa raekoostumus määrätään mittaamalla lietteen ominaispaino ottamalla areometrilukemat eri ajankohtina. Sekoituksen loputtua maahiukkaset laskeutuvat mittastian pohjalle. Tällöin lietteen ominaispaino pienenee ja muutoksista ajan funktiona voidaan määrätä maan raekoostumus. [SGY 1985].

Areometrimenetelmällä saadaan laskettua rakeisuuskäyrä myös alle 0,0063 mm raekoolle erona kuivaseulontaan. Areometrin ja kuivaseulonnan yhdistelmällä saadaan vertailukelpoinen rakeisuuskäyrä hiilipölytuhkille.

Kuivaseulonta

Kuivaseulonta on kitkamaalajien rakeisuusmäärittäyskoe. Koe suoritetaan seulomalla näyte seulasarjassa ja piirtämällä rakeisuuskäyrä. Seulasarja sisältää seulakoot 0,0063–64 mm. Seulasarja on GLO-85 mukainen.

5.1.2 Proctor-koe

Pohjatuhkan tiivistettävyyttä testattiin normaalilla ja parannetulla proctor-kokeella. Kokeen tuloksena saatavat maksimikuivatilavuuspaino ja tätä vastaava optimivesipitoisuus

kuvaavat materiaalin tiiveintä tilaa. Kuivatilavuuspainolla tarkoitetaan maanäytteen kuivapainon suhdetta näytteen tilavuuteen. Proctor-kokeilla saadaan materiaalille proctor-kuvaaja, josta voidaan päätellä vesipitoisuuden ja tilavuuspainon yhteys. [SGY 1985].

Parannetussa proctor-kokeessa näytettä tiivistetään viitenä kerroksena proctormuotissa. Jokaista kerrosta sullotaan vasaralla (massa 4500 g) 25 pudotuksen verran. Kevyt proctor-koe tehdään vastaavasti käyttäen kevyempää vasaraa (massa 2500 g) ja tiivistämällä näyte kolmena kerroksena. Tiivistetyn näytekappaleen tavoitteellinen korkeus on noin 120 mm, josta ylimääräinen osa leikataan pois.

Pohjatuhkan tutkiminen parannetulla proctor-kokeella on kyseenalaista, koska painavampi vasara rikkoo tuhkarakeita ja muuttaa siten materiaalin koostumusta.

5.1.3 Kiintotiheys

Kiintotiheys kuvaa huokosettoman maa-aineksen tiheyttä. Kiintotiheys mitataan pyknometrimenetelmällä eli ns. vedessäpunnitusmenetelmällä. Kokeessa kuivattu ja hienonnettu näyte punnitaan ilmassa ja vedessä. Märän tuhkanäytteen ilma imetään pois huokosista vakuumieksikaattorin avulla, jolloin näyte saadaan täysin kyllästettyä. Mittauksia tehdään kaksi jokaista tuhkatyyppiä kohden ja tuloksista lasketaan keskiarvo.

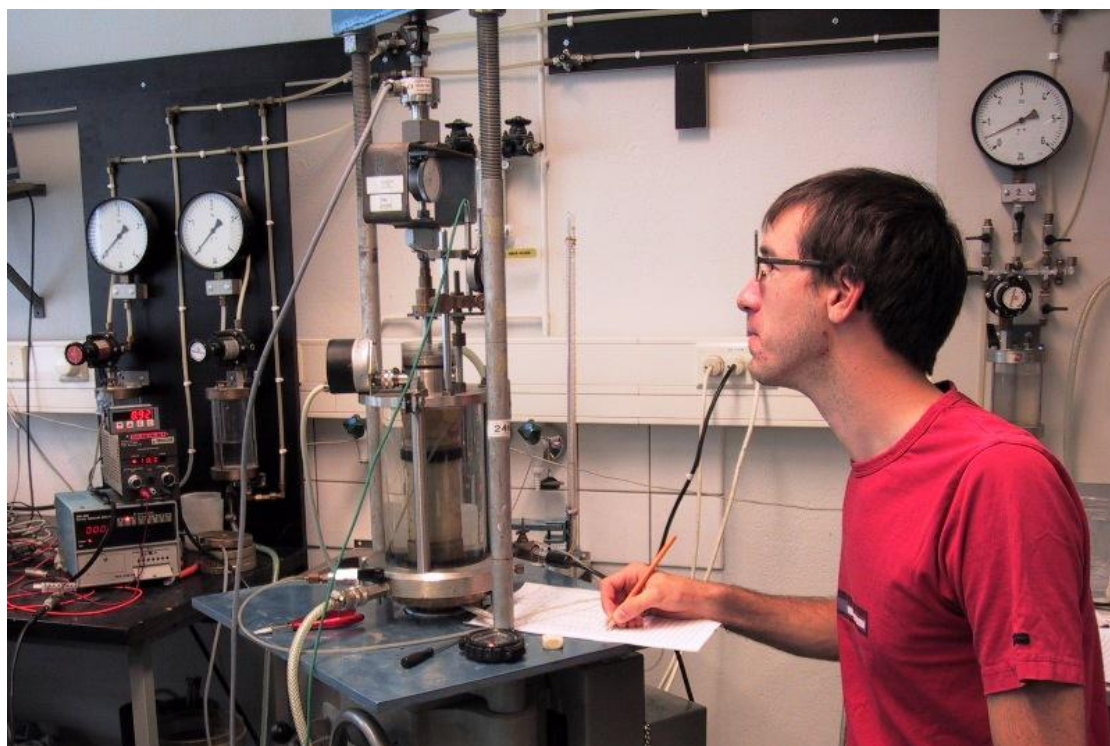
Pohjatuhkan huokoisen raekoostumuksen takia on kiintotiheyden määrittämisessä virhemahdollisuus, mikäli kaikkea ilmaa ei saada huokosista pois.

5.1.4 Kolmiakselikoe

Kolmiakselikoe on leikkauslujuuden ja jännitys-muodonmuutosominaisuuksien määrittämis menetelmistä monipuolisin ja tarkin [Rantamäki et al. 1992]. Kokeessa sylinterin muotoista, läpäisemättömällä kumikalvolla verhottua näytekappaletta tuetaan ympäröivän veden sellipaineella ja kuormitetaan koekappaleen päältä kohtisuorasti kolmiakselisellissä. Kokeen jännitystilanne vastaa hyvin luonnossa vallitsevaa tilannetta.

Martinlaakson hiilipölytuhkalla rakennettiin neljä koekappaletta messinkimuottiin (hal-
kaisu 5,0 cm ja korkeus 10,0 cm) PVC-tangolla sullomalla. Avoimia kokeita (CADC)
tehtiin kolme sellipaineilla 50, 75 ja 100 kPa ja lisäksi yksi suljettu koe (CAUC) selli-
paineella 50 kPa. Avoimessa kokeessa näytteen huokosvesi pääsee poistumaan kuormi-
tuksen aikana ja suljetussa kokeessa huokosveden poistuminen on estetty. Näytekappa-
leet valmistettiin samalla sekoitussuhteella, jolloin muottiin sullottujen näytekappaleen
vesipitoisuus vaihteli välillä 68–85 %. Näytekappaleen annettiin kyllästyä vedellä ennen
kuormittamista. Kolmiakselikokeen koejärjestelyt on esitetty kuvassa 5.1.

Kuormituksen aikana kirjataan ylös aksiaalinen jännitys voimarenkaan mittakellosta ja
aksiaalinen muodonmuutos mittakellosta. Lisäksi avoimessa kokeessa seurataan näyt-
teestä poistuvan veden määrää byretin mitta-asteikosta ja suljetussa kokeessa huokosve-
den paineen muutoksia. Mittaukset kirjataan laskentatiedostoon ajan funktiona.



Kuva 5.1. Martinlaakson hiilipölytuhkan kolmiakselikokeen koejärjestelyt Teknillisen
korkeakoulun laboratoriossa. [Kuva: Jarmo Vihervuori / TKK].

Kolmiakselikokeessa CADC 4811A näytekappaleen pystymuodonmuutosta seurattiin mittakellon lisäksi HBN Solatron sähköisellä mitta-anturilla. Kokeelle CADC 4811A tehtiin toistokuormitus.

Kolmiakselikokeen tuloksina saadaan mm. tutkittavan maan kitkakulma, koheesio, moduuli ja kriittisen tilan jännityssuhde.

5.1.5 Vesipitoisuusmääritys

Kaikista kolmen pohjatuhkanäytteen kolmesta osanäytteestä määritettiin avovarastoidun tuhkan vesipitoisuus kuivaamalla näyte uunissa, jonka lämpötila oli 105 °C. Vesipitoisuus on näytteen veden massan suhde kuiva-aineksen massaan prosentteina.

5.1.6 Rasialeikkauskoe

Pohjatuhkan kitkakulma ja koheesio määritettiin myös rasialeikkauskokeella. Koe tehtiin pienellä Casagranden rasialla, jonka korkeus oli 4,41 cm ja poikkipinta-ala 35,65 cm². Koe suoritettiin löyhänä ja tiiviinä, luonnontilaisella vesipitoisuudella normaalijännityksen arvoilla 15, 30 ja 60 kPa. Löyhän ja tiiviin näytteen kuivatilavuuspainojen keskiarvot on esitetty taulukossa 5.1. Normaalijännityksen arvoilla mitatut leikkausvoimat piirretään normaalivoima-leikkausjännitys-koordinaatistoon ja yhdistetään likimääräisellä suoralla. Pisteiden asettuessa samalle viivalle kokeen voidaan arvioida onnistuneen.

Taulukko 5.1. Rasialeikkauskoe. Pohjatuhkien kuivatilavuuspainojen keskiarvot löyhälle ja tiiviille näytteelle.

	Löyhä näyte [kN/m ³]	Tiivis näyte [kN/m ³]
Martinlaakson hiilipölytuhka	6,3	10,5
Suomenojan hiilipölytuhka	6,0	10,1
Suomenojan leijupetituhka	13,1	14,2

Tiivis näyte tiivistettiin käsivoimin puupalaa tai PVC-tankoa apuna käyttäen. Löyhä näyte tasattiin leikkausrasiaan mutta ei tiivistetty. Suomenojan leijupetituhkan rakeisuus

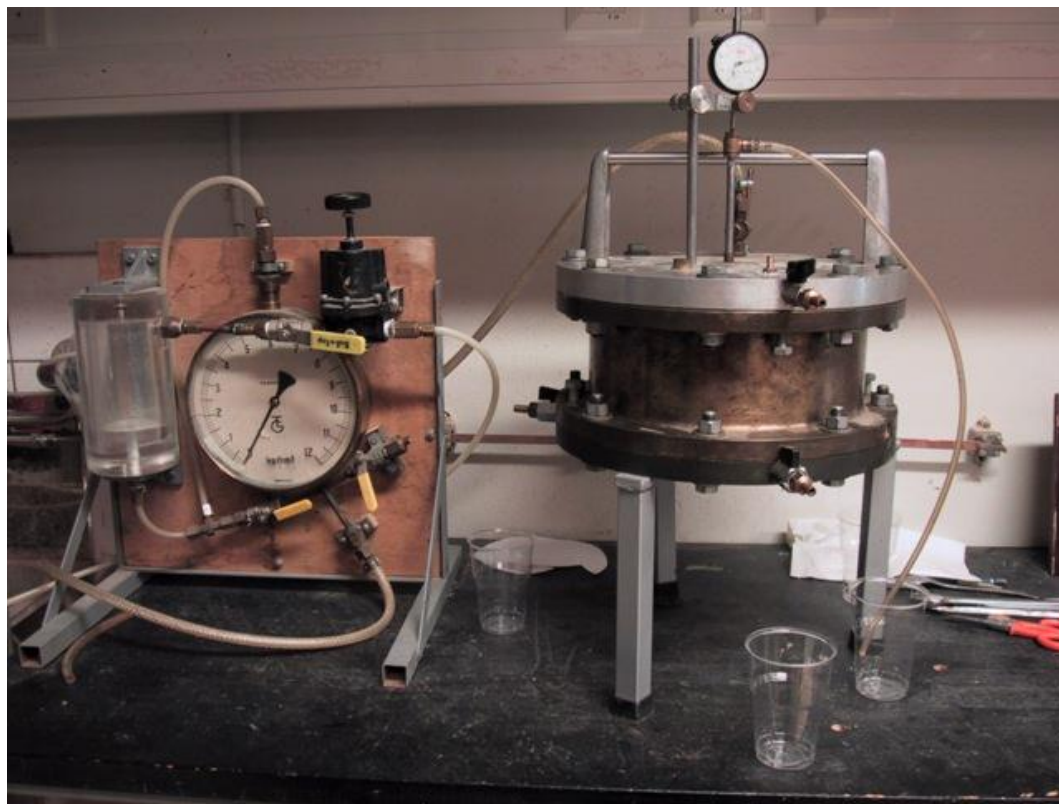
leikattiin alle 8 mm fraktioksi ennen kokeen suorittamista. Kaikki näytteet koestettiin heti rasiaan sullomisen jälkeen, joten mahdollista lujittumista ei ehtinyt tapahtua. Rasialeikkauskokeen koejärjestely on esitetty kuvassa 5.2.



Kuva 5.2. Rasialeikkauskokeen koejärjestelyt Teknillisen korkeakoulun laboratoriossa.
[Kuva: Jarmo Vihervuori / TKK]

5.1.7 Rowen ödometri

Suomenojan ja Martinlaakson hiilipölykattilan pohjatuhkan kokoonpuristuvuusominaisuuksia mitattiin portaittain kuormitettavalla ödometrillä (Rowen selli). Kokeessa käytetty selli on mitoiltaan tavanomaista ödometria suurempi. Näytekappaleen tavoitekorkeus on 8 cm ja sellin halkaisija on 25,4 cm. Kuormitus tehtiin ilmanpaineella. Kuormitusportaina käytettiin paineita 40, 80, 120, 160, 200 ja 240 kPa. Koejärjestely on esitetty kuvassa 5.3.



Kuva 5.3. Rowen ödometrin koejärjestelyt Teknillisen korkeakoulun laboratoriossa.

5.1.8 Vedenläpäisevyys

Pohjatuhkan vedenläpäisevyyttä testattiin pääasiassa vakiopainekokeella, mutta vedenläpäisevyyttä testattiin myös muuttuvapainekokeella proctor-muotissa.

Vakiopainekoe

Vakiopainekokeessa johdettiin vesi näytesylinterin läpi ja kerättiin mittalasiin punnittavaksi mitaten samalla aikaa. Koekappaleen annettiin kyllästyä ennen mittauksia. Käytetyn koesyylinterin halkaisija oli 60 mm ja näytekappaleen korkeus 75 mm. Koesylinterin pohjalle levitettiin soraa noin 20 mm kerros ja päälle asetettiin tiheä seula verkko. Myös näytekappaleen päälle asetettiin seula verkko ja noin 20 mm kerros soraa.

Muuttuvapainekoe

Muuttuvapainekokeessa vesi johdettiin byretistä proctor-koekappaleen läpi ja tarkasteltiin byretin mitta-asteikosta tietyssä ajassa koekappaleen läpi virranneen veden määrää.

Koe suoritettiin kannellisessa proctor-muotissa, jonka korkeus oli 11,6 cm ja poikkipinta-ala $81,71 \text{ cm}^2$. Näytteen pohjalle asetettiin huokoskivi ja suodatinpaperi. Myös näytteen päälle asetettiin suodatinpaperi. Testi tehdään vähintään kolme kertaa ja mitatuista tuloksista lasketaan keskiarvo materiaalin vedenläpäisevyydeksi. [Gardemeister 1966].

5.1.9 Kapillaarisuus

Maan kapillaarisuus ilmenee veden pinnan nousuna maan huokosketjuissa vallitsevaa vedenpinnan tasoa korkeammalle. Nousu johtuu kapillaariputkiston seinämän ja nesteen välisestä vetovoimasta sekä nesteen pintajännityksestä. Veden kapillaarinen nousu jatkuu tasoon, jossa kohonneeseen vesimassaan vaikuttava painovoima ja kapillaarivoimat pitävät toisensa tasapainossa. [Rantamäki et al. 1992].

Kapillaarisen nousukorkeuden määrittäminen tehtiin Teknillisen korkeakoulun kapillaarimetriellä. Kokeessa noin 2 cm korkuinen pohjatuhkamaanäyte kyllästettiin täysin vedellä ja alapuolelle muodostettiin alipaine. Alipainetta suurennettaessa kapillaarimetrimen elohopeamittapintojen erotus kasvaa. Kapillaarinen nousukorkeus on elohopeapintojen erotuspaine-eron ollessa niin suuri, että ulkopuolinen ilma murtautuu kapillaarista vettä sisältävän näytteen läpi.

Kapillaarinen nousukorkeus mitattiin Martinlaakson ja Suomenojen hiilipölytuhkille.

5.1.10 Puristuslujuus

Lohja Ruduksen teettämät Martinlaakson ja Suomenojan voimalaitoksen pohjatuhkan puristuslujuusmittaukset tehtiin Salvorin laboratoriossa ICT-kiertotiivistyslaitteella. ICT-laite tiivistää koekappaleen sylinterissä säädettävällä paineella ja tämän jälkeen leikkaustiivistää koekappaleen valitulla kierrosmäärällä [Mäkelä et al. 1995]. Koetta valmisteltiin tekemällä pohjatuhkalle proctor-kokeet, joilla määritettiin optimivesipitoisuus ja maksimikuivatilavuuspaino. Koekappaleista määritettiin vesipitoisuus ja kuivatilavuuspaino ja tuloksia verrattiin proctor-kokeella määritettyyn optimivesipitoisuuteen ja

maksimikuivatilavuuspainoon. Kuivatilavuuspainojen suhteesta voidaan määrittää tiiviyssaste (%) kaavan 4.2 avulla.

Koekappaleita valmistettiin kolme (7 d, 28 d ja 91 d) jokaista pohjatuhkatyyppiä kohden. Puristuspäivään asti koekappaleet säilytettiin kosteuskaapissa avonaisissa muovipusseissa, jotta pohjatuhkan mahdollinen lujittuminen saavutettaisiin. Puristusnopeus oli 5 kN/s.

5.2 Laboratoriokokeiden tulokset ja niiden analysointi

5.2.1 Rakeisuus

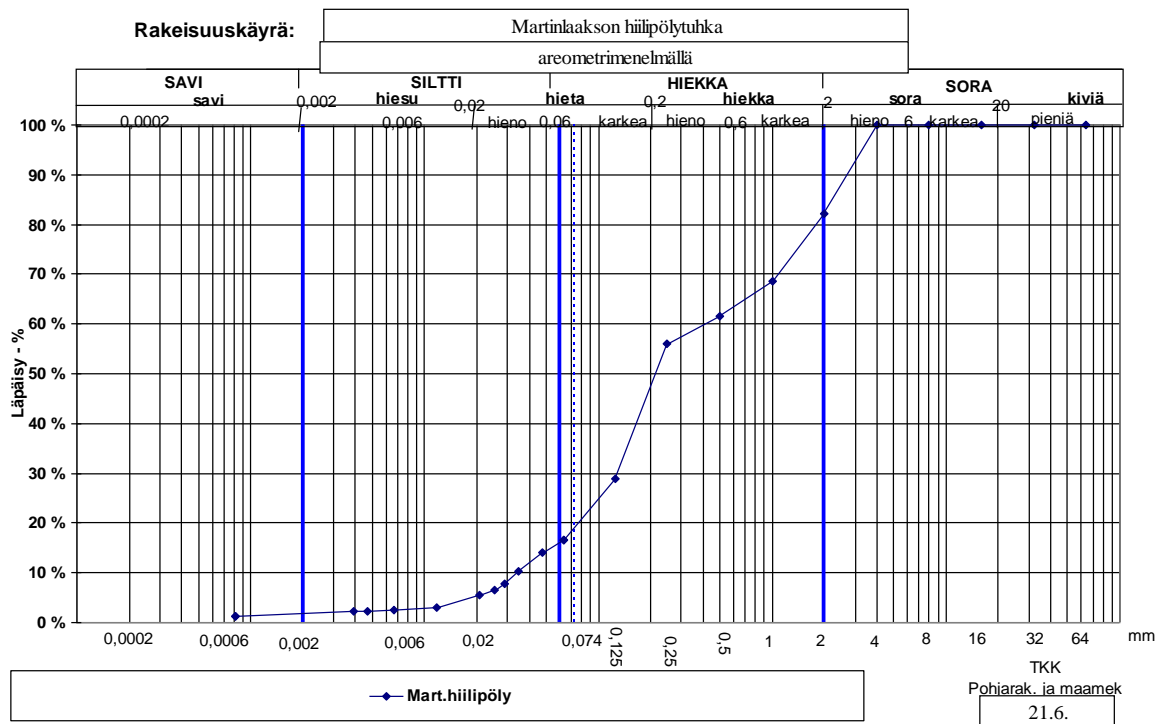
Hiilipölytuhkan rakeisuus määritettynä areometrimenetelmällä vastaa lähinnä hiekkaa (Martinlaakson hiilipölytuhka) tai siltistä hiekkaa (Suomenojan hiilipölytuhka).

Areometrimenetelmä voi antaa epäluotettavia tuloksia rakeisuuskäyrän hienoainesosaan, sillä areometrin propelli voi sekoitusvaiheessa rikkoa tuhkan sitoutuneita rakeita. Lisäksi pohjatuhkan lasimaiset lentotuhkahiukkaset ovat kevyempiä kuin normaalikiviaines, jolle areometri on kalibroitu. Edellä mainittu seikka saattaa lisätä virheen mahdollisuutta.

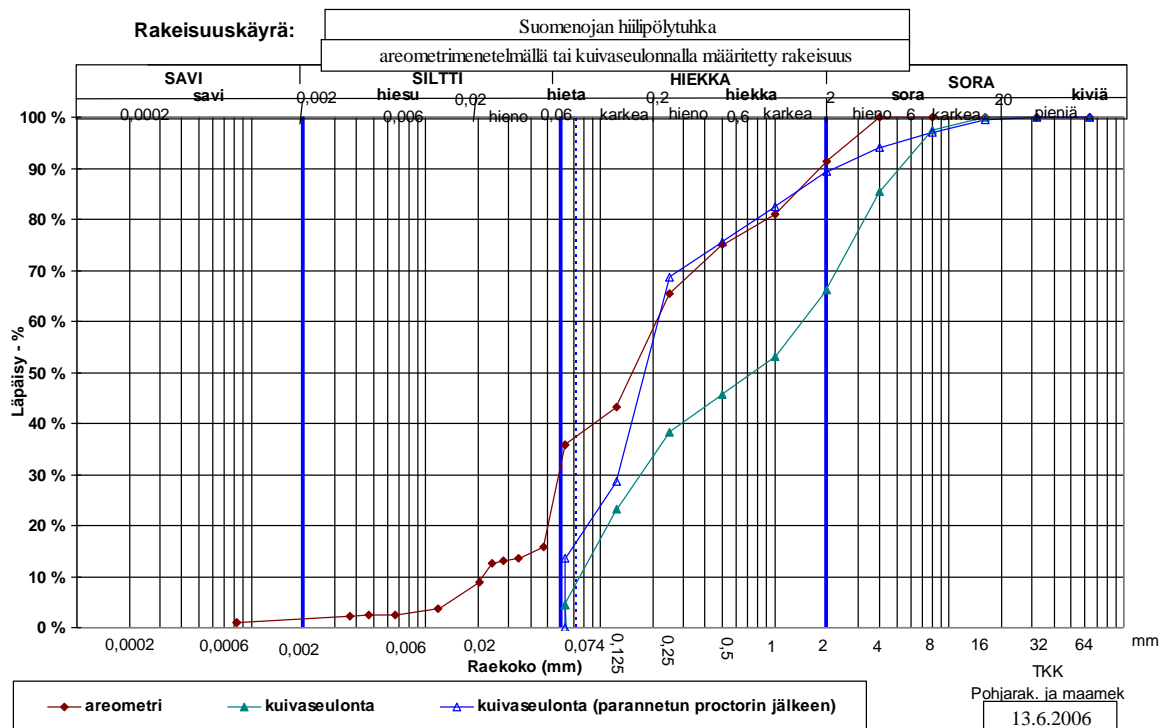
Suomenojan leijupetituhka on rakeisuudeltaan hiekkaista soraa, josta puuttuu hienoaines lähes kokonaan.

Suomenojan hiilipölytuhkan rakeisuuskäyrästä parannetun proctor-kokeen jälkeen voidaan todeta vasaran murskanneen rakeita, joiden koko oli alle 8 mm.

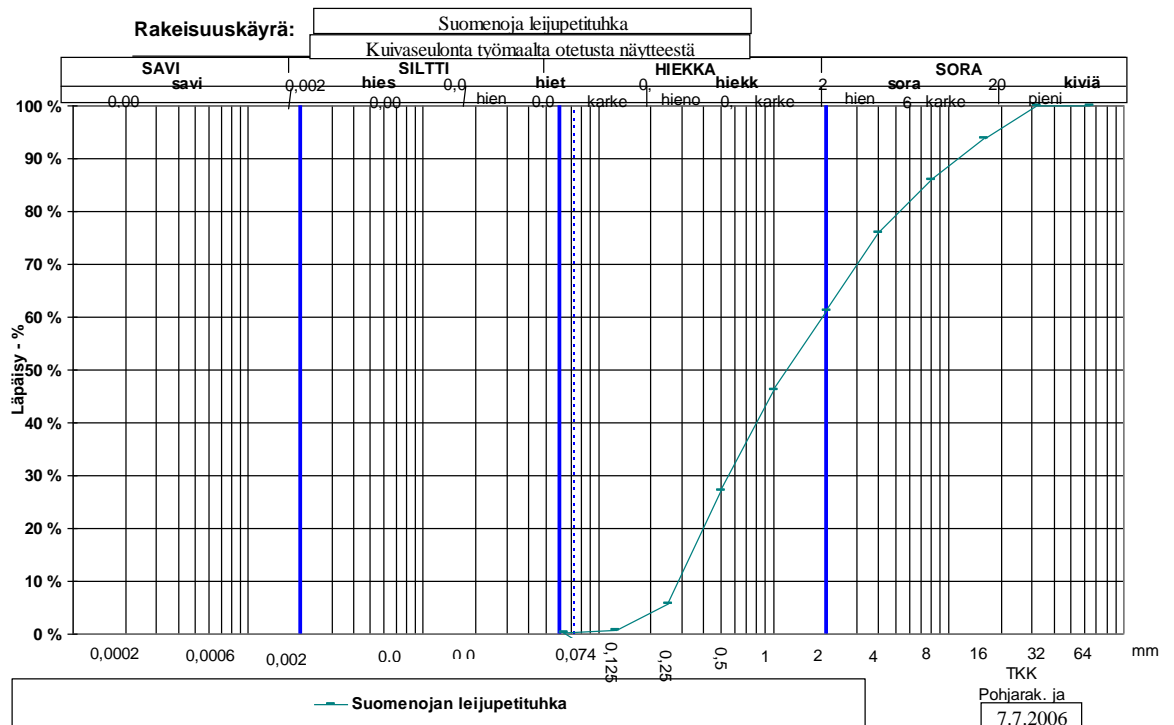
Martinlaakson hiilipölytuhkan, Suomenojan hiilipölytuhkan ja Suomenojan leijupetituhkan rakeisuuskäyrät on esitetty kuvissa 5.4–5.6.



Kuva 5.4. Martinlaakson hiilipölytuhkan rakeisuus määritettynä areometrilla ja kuivaseulomalla.



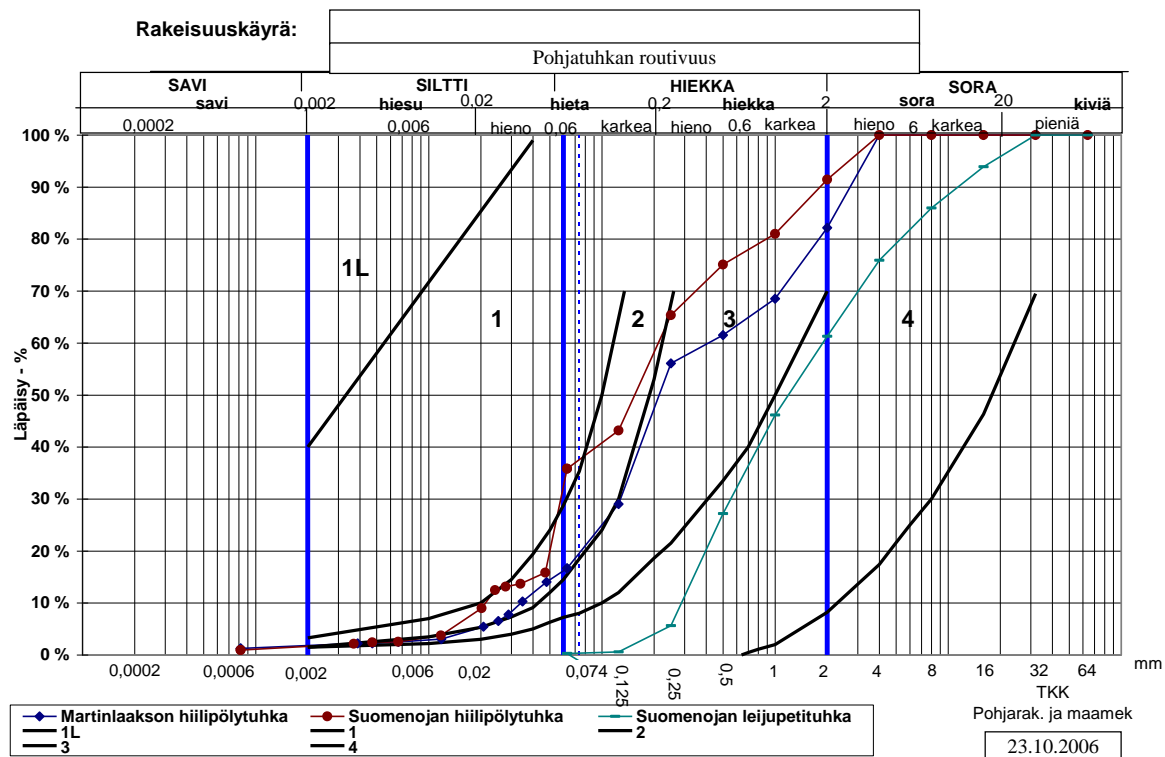
Kuva 5.5. Suomenojan hiilipölytuhkan rakeisuudet määritettynä areometrilla ja kuivaseulomalla. Myös murskatun näytteen rakeisuutta tutkittiin.



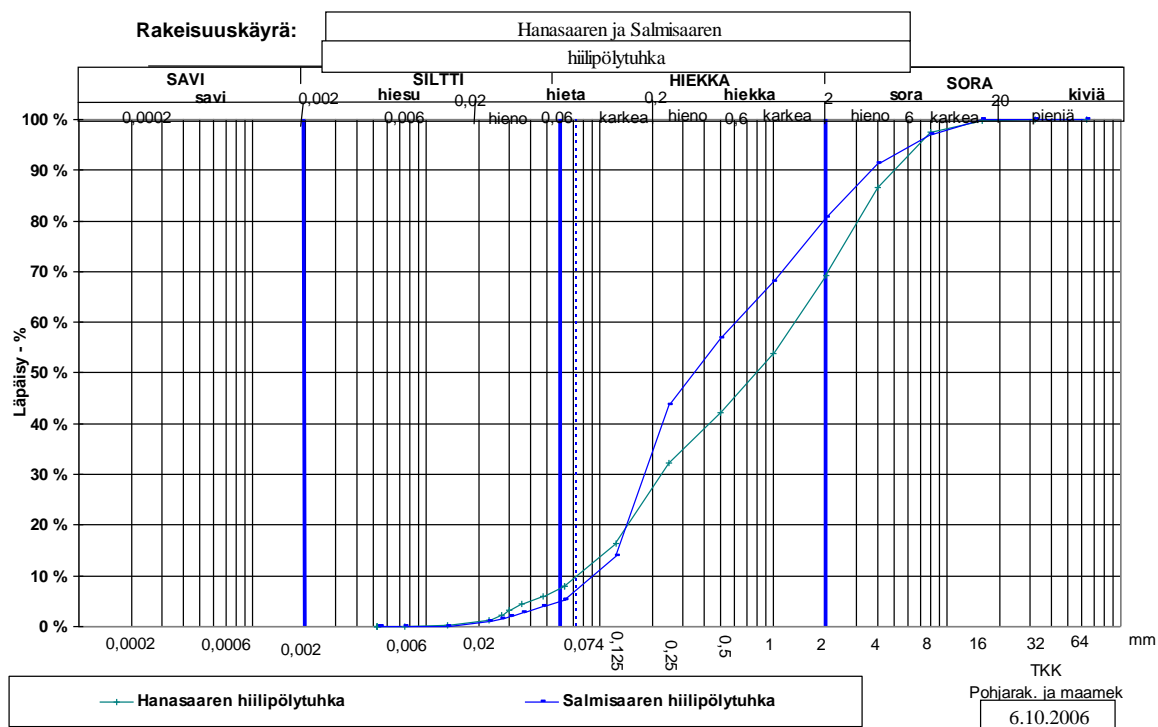
Kuva 5.6. Suomenojan leijupetituhkan rakeisuus määritettynä kuivaseulonnalla.

Pohjatuhkaa pidetään yleensä routimattomana materiaalina. Laboratoriossa tehdyt rakeisuusmääritykset kuitenkin osoittavat Martinlaakson ja Suomenojan hiilipölytuhkat lievästi routiviksi. Routivuuskuvaaja on esitetty kuvassa 5.7. Hiilipölytuhkan routivuuden selvittämiseksi määritettiin kapillaarinen nousukorkeus. Tulokset on esitetty kappaleessa 2.2.9.

Martinlaakson ja Suomenojen voimalaitosten pohjatuhkien rakeisuuksien vertailukohdaksi määritettiin Hanasaaren ja Salmisaaren kivihiilivoimalaitosten hiilipölykattilan pohjatuhkan rakeisuudet areometrin ja kuivaseulonnan yhdistelmällä. Rakeisuuskäyrät on esitetty kuvassa 5.8. Maalaji on routimaton jos rakeisuuskäyrä sijoittuu vyöhykkeille 2-4 edellyttäen, että rakeisuuskäyrien alapäävät eivät leikkaa kunkin erillisvyöhykkeen vasemmanpuoleista rajakäyrää.



Kuva 5.7. Pohjatuhkan rakeisuudet routivuuskuvaajassa.



Kuva 5.8. Hanasaaren ja Salmisaaren hiilipölytuhkan rakeisuuskäyrät.

5.2.2 Proctor-koe

Kaikki kolme tuhkatyyppiä koestettiin luonnontilaisessa vesipitoisuudessa (näytteet varastokasasta 15.5.2006) parannetulla ja normaalilla proctor-kokeella. Suomenojan hiilipölytuhka oli niin märkää, että parannettu proctor-koe ei onnistunut ja normaali proctor-koe vain välttävasti. Saadut kuivatilavuuspainot luonnontilaisessa vesipitoisuudessa on esitetty taulukossa 5.2.

Ennakko-odotusten mukaisesti parannetulla proctor-kokeella voidaan todeta materiaalin tiivistyvän enemmän.

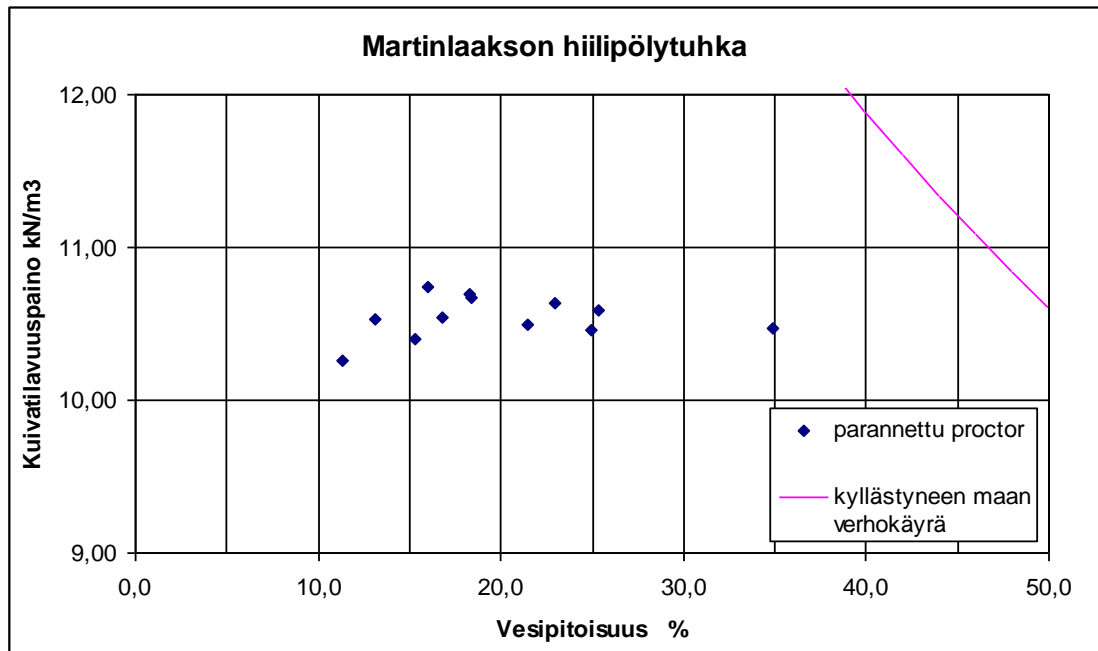
Parannetulla proctor-kokeella selvitettiin kuivatilavuuspainoa lähellä optimivesipitoisuutta. Koetuloksissa oli jonkin verran hajontaa ja siksi yksiselitteistä yhteyttä vesipitoisuuden ja kuivatilavuuspainon välillä on vaikea piirtää normaaliin tapaan käyrällä. Maksimikuivatilavuuspainot on esitetty taulukossa 5.3 ja kuivatilavuuspainon ja vesipitoisuuden yhteys kuvissa 5.9–5.11.

Taulukko 5.2. Luonnontilaisella vesipitoisuudella määritetyt kuivatilavuuspainot parannetulla ja normaalilla proctor-kokeella määritettynä.

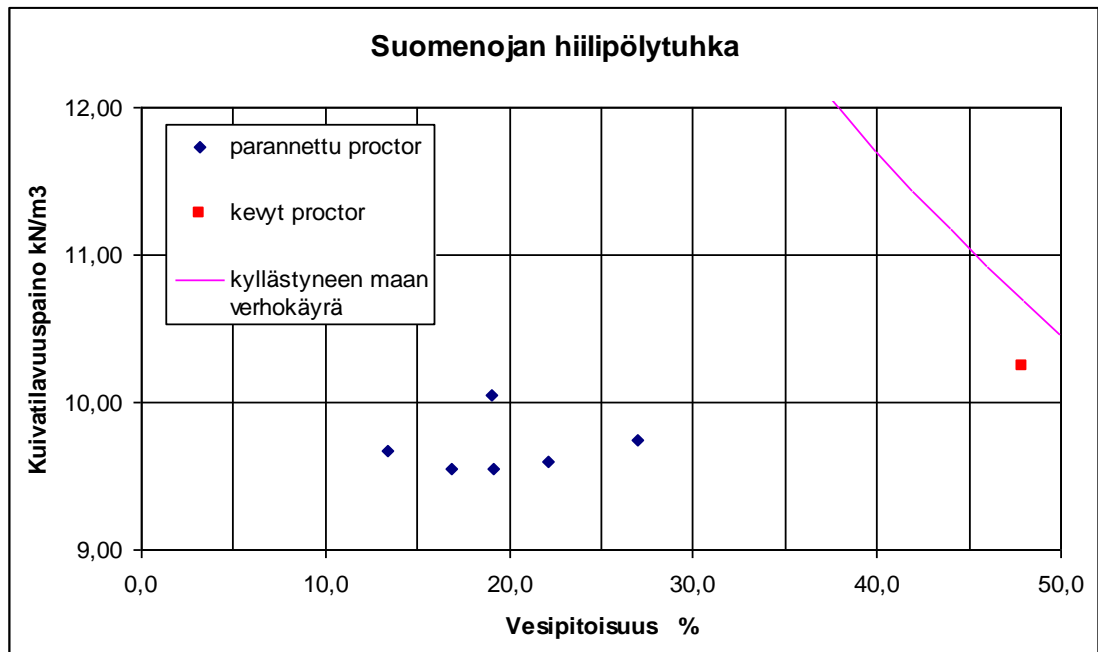
Koe / materiaali	Martinlaakson hiilipölytuhka	Suomenojan hiilipölytuhka	Suomenojan leijupetituhka
”Luonnontilainen” vesipitoisuus, w	34,9 %	49,5 %	7,1 %
Parannettu proctor-koe, $\gamma_{d,max}$	10,5 kN/m ³	-	14,7 kN/m ³
Kevyt proctor-koe, $\gamma_{d,max}$	9,2 kN/m ³	10,2 kN/m ³	14,2 kN/m ³

Taulukko 5.3. Parannetulla proctor-sullonnalla mitatut maksimikuivatilavuuspainot.

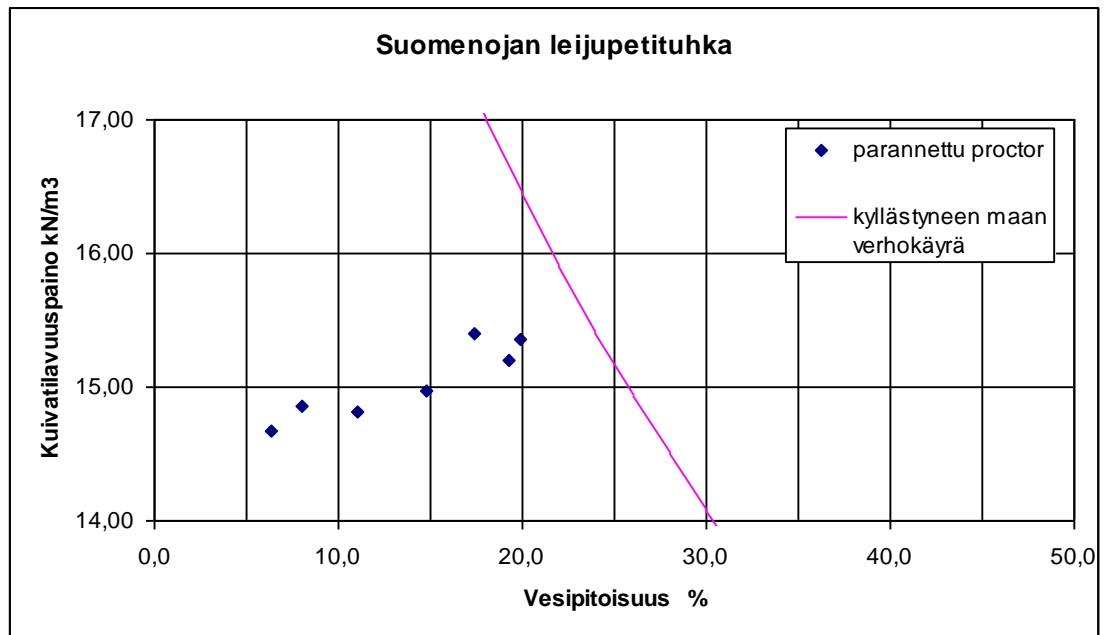
Materiaali	Maksimikuivatilavuuspaino $\gamma_{d,max}$	w_{opt}
Martinlaakson hiilipölytuhka	10,7 kN/m ³	16,0 %
Suomenojan hiilipölytuhka	10,0 kN/m ³	19,1 %
Suomenojan leijupetituhka	15,4 kN/m ³	17,4 %



Kuva 5.9. Martinlaakson hiilipölytuhkan parannetulla proctor-sullonnalla mitatut kuivatilavuuspainot.



Kuva 5.10. Suomenojan hiilipölytuhkan parannetulla ja kevyellä proctor-sullonnalla mitatut kuivatilavuuspainot.



Kuva 5.11. Suomenojan leijupetituhkan parannetulla proctor-sullonnalla mitatut kuivatilavuuspainot.

Avovarastoidun Suomenojan hiilipölytuhkan vesipitoisuudella ($w=48,0$ %) saatu kuivatilavuuspaino on epäluotettava. Koe tehtiin kevyellä proctor-laitteistolla ja koe ei onnistunut hyvin suuren vesipitoisuuden takia.

Suomenojan leijupetituhkan kuivatilavuuspainon voidaan todeta kasvavan vesipitoisuutta lisättäessä. Suomenojan leijupetituhka liettyy, kun proctor-näytteen vesipitoisuus lähenee 20 %.

Optimivesipitoisuuden vertailuarvoina on käytetty Lohja Rudukselta saatuja mittaustuloksia (liite 13) ja Helsingin Energian Pohjatuhkaohjeen [Viatek Oy 2001] optimivesipitoisuuksia Helsingin voimaloiden hiilipölytuhkille. Arvot on esitetty taulukossa 5.4.

Taulukko 5.4. Pohjatuhkan optimivesipitoisuuden vertailuarvoja.

w_{opt} - vertailuarvot	Martinlaakson hiilipölytuhka	Suomenojan hiili- pölytuhka	Suomenojan lei- jupetituhka
Miikka Hakari	16,0 %	19,1 %	17,4 %
ICT-laitteella (liite 13)	13,0 %	19,0 %	11,3 %
Pohjatuhkaohje [Helsingin Energia, Viatek Oy 2001]	20–24 % (Hanasaaren ja Salmisaaren hiilipölytuhkat)		-

5.2.3 Kiintotiheys

Hiilipölytuhka sisältää kiintotiheydeltään erilaisia hiukkasia: lasipallomaisia lentotuhka-hiukkasia, suurempia sintrautuneita kuonakappaleita sekä yhteentarttuneita lentotuhka-hiukkasryhmiä. Leijupetituhka sisältää lisäksi luonnonkiviainesta kuten hiekkaa ja soraa.

Määritetyt kiintotiheydet on esitetty taulukossa 5.5.

Tuloksista voidaan todeta tuhkarakeiden olevan tavanomaista luonnon kiviainesta ($\rho_s=2,65 \text{ g/cm}^3$) kevyempää. Suomenojan hiilipölytuhkan raekoostumus on esitetty kuvassa 5.12.

Taulukko 5.5. Martinlaakson hiilipölytuhkan, Suomenojan hiilipölytuhkan ja Suomenojan leijupetituhkan kiintotiheysmittausten keskiarvot

	Keskiarvo ρ_s [g/cm^3]
Martinlaakson hiilipölytuhka	2,35
Suomenojan hiilipölytuhka	2,28
Suomenojan leijupetituhka	2,52



Kuva 5.12. Hiilipölytuhka sisältää kiintotiheydeltään erilaisia hiukkasia. Kuvassa Suomenojan hiilipölytuhka. Oikealla vasaralla murskattu kuonapaakku.

5.2.4 Kolmiakselikoe

Ensimmäinen avoin kolmiakselikoe (CADC 4811A) ei tulosten perusteella onnistunut täysin. Kokeessa voima on kasvanut suuremmaksi kuin suuremmilla sellipaineilla tehdyillä kokeilla. Tulosten järjestys on epälooginen ja kokeen CADC 4811A tuloksia voidaan pitää epäluotettavina.

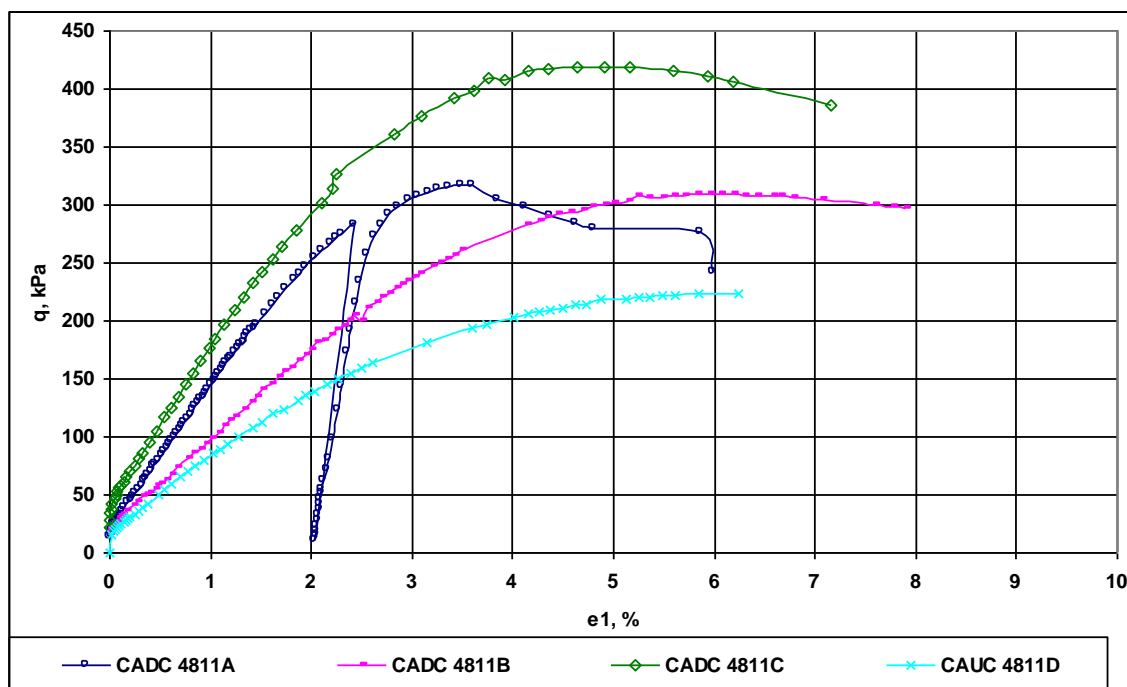
Martinlaakson hiilipölytuhkan kolmiakselikokeiden näytekappaleista mitattiin taulukon 5.6 mukaiset arvot.

Kolmiakselikokeiden tuloksista piirretty deviatorinen jännitys-akσιαalinen muodonmuutos – kuvaaja on esitetty kuvassa 5.13.

Koetuloksista laskettiin Martinlaakson hiilipölytuhkan kitkakulma, koheesio ja kriittisen tilan jännityssuhde. Tulokset on esitetty taulukossa 5.7. Materiaalin 50 % jännitystä vastaavan muodonmuutosmoduuli (E_{50} -moduuli) on esitetty taulukossa 5.8.

Taulukko 5.6. Martinlaakson hiilipölytuhkan kolmiakselikappaleista mitatut suureet ennen konsolidointia. Huokosluku e_1 on mitattu konsolidoinnin jälkeen.

	Sellipaine	Vesipitoisuus	Huokosluku	Huokosluku	Tiheys	Kuivatiheys
Kokeen nimi	kPa	w [%]	e_0	e_1	ρ_0 [g/cm ³]	ρ_0 [g/cm ³]
CADC 4811A	50	84,8	1,93	1,84	1,48	0,80
CADC 4811B	75	75,4	1,71	1,42	1,52	0,87
CADC 4811C	100	69,7	1,74	1,48	1,46	0,86
CAUC 4811D	50	68,3	1,71	1,60	1,46	0,87



Kuva 5.13. Martinlaakson hiilipölytuhkan kolmiakselikokeiden deviatorinen jännitys-akσιαalinen muodonmuutos -kuvaajat. CADC 4811A lieene epäonnistunut.

Taulukko 5.7. Martinlaakson hiilipölytuhkan kolmiakselikokeesta määritetyt kitkakulma, koheesio ja kriittisen tilan jännityssuhde.

	Koheesio c'	Kitkakulma φ'	Kriittisen tilan jännityssuhde $M=q/p$
Martinlaakson hiilipölytuhka	13,0 kPa	41,5°	1,7

Taulukko 5.8. Martinlaakson hiilipölytuhkan kolmiakselikokeesta lasketut E_{50} -moduulit.

Koenumero	E_{50} -moduulit
CAUC 4811D (50 kPa)	63 kPa
CADC 4811B (75 kPa)	83 kPa
CADC 4811C (100 kPa)	163 kPa

5.2.5 Vesipitoisuus

Ennakkokokeiden osanäytteiden vesipitoisuushajonta oli vähäinen ja siksi osanäytteet yhdistettiin yhdeksi näytteeksi kuvaamaan kunkin voimalaitoksen tuhkatyyppiä.

Osanäytteiden vesipitoisuudet on esitetty taulukossa 5.9. Osanäytteiden keskiarvoa on myöhemmin käytetty kuvaamaan kunkin voimalaitoksen tuhkatyyppiä.

Suomenojan hiilipölytuhkan näyte nro. 1 on näytteenottoa edellisenä päivänä tuotu voimalasta varastokasalle. Tuore tuhka sisältää yleensä enemmän vettä kuin pidempään varastokasassa ollut tuhka.

Taulukko 5.9. Martinlaakson hiilipölytuhkan, Suomenojan hiilipölytuhkan ja Suomenojan leijupetituhkan ennakkokokeena määritetyt vesipitoisuudet.

Näyte nro. tuhkatyyppittäin	Martinlaakson hiilipölytuhka [%]	Suomenojan hiilipölytuhka [%]	Suomenojan leijupetituhka [%]
1	37,3	54,3	8,2
2	30,1	46,7	6,3
3	33,7	47,4	6,8
Keskiarvo	33,7	49,5	7,1

5.2.6 Kitkakulma ja koheesio

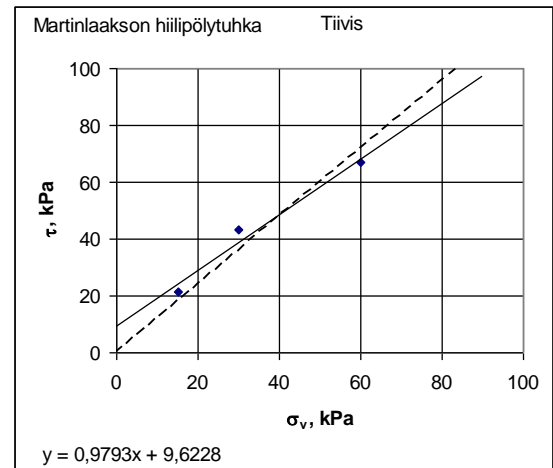
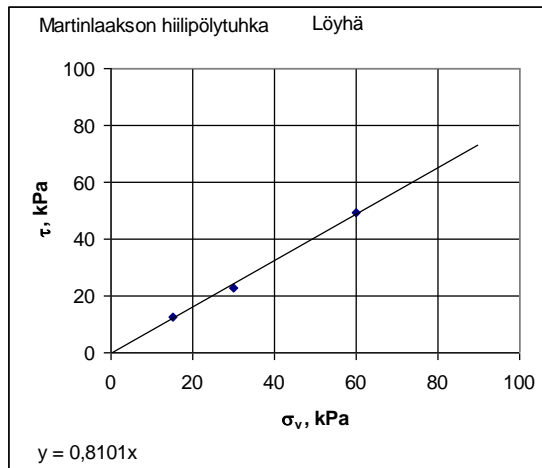
Pienellä rasialeikkauskokeella määritetyt kitkakulma ja koheesio on esitetty taulukossa 5.10. Löyhän näytteen leikkausvoiman maksimi rajoitettiin 20 kierroksen kohdalle (siirtymä 49–50 % normaalista mitattavasta siirtymästä), koska voima kasvaa muuten kokeen loppuun asti.

Normaalivoima-leikkausjännitys – kuvaajat löyhälle ja tiiviille näytteelle on esitetty kuvissa 5.14–5.16. Tiiviille näytteelle on määritetty myös kuvaaja, jossa koheesio on pakotettu nolllaksi.

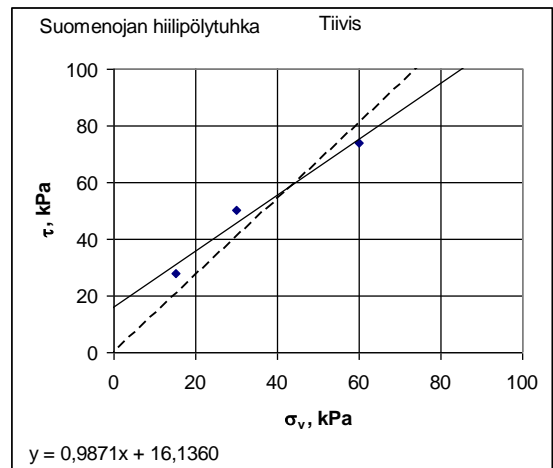
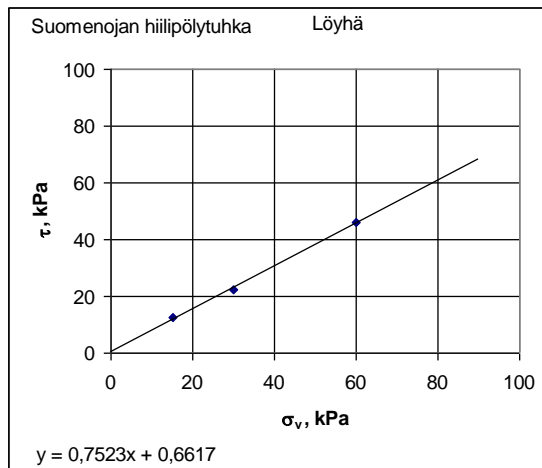
Tiiviin leijupetituhkan rasialeikkauskokeissa rakeet tunkeutuivat ylemmän ja alemman rasian leikkauspinnan väliin kokeen edetessä, aiheuttaen pientä löyhtymistä näytteessä. Ilmiö on normaali karkearakeisille maalajeille. Suomenojan leijupetituhkan tiiviillä näytteellä, normaalijännityksellä 60 kPa tehty rasialeikkauskoe epäonnistui. Koe korvattiin tekemällä koe löyhälle ja tiiviille näytteelle normaalijännityksellä 45 kPa.

Taulukko 5.10. Martinlaakson hiilipölytuhkan, Suomenojan hiilipölytuhkan ja Suomenojan leijupetituhkan löyhän ja tiiviin näytteen koheesio ja kitkakulma määritettynä pienellä rasialeikkauskokeella normaalijännityksellä 15, 30 ja 60 kPa. Tiiviillä näytteellä on esitetty myös kitkakulma, joka määritetty olettamalla koheesio nolllaksi.

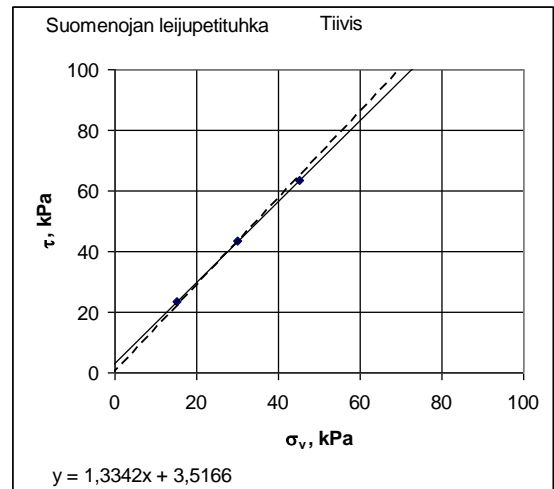
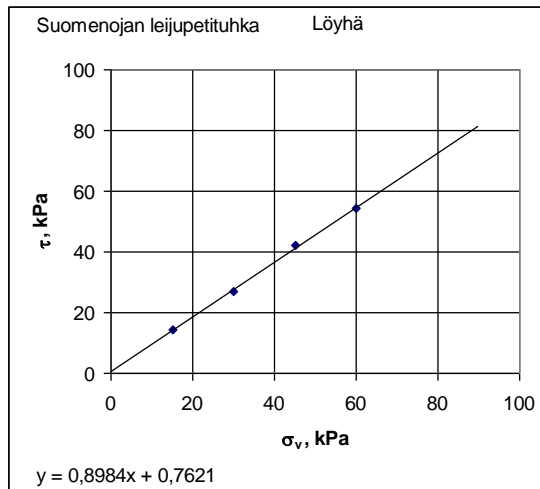
	Löyhä näyte		Tiivis näyte	
	Koheesio [kPa]	Kitkakulma [°]	Koheesio [kPa]	Kitkakulma [°]
Martinlaakson hiilipölytuhka	0	39,0	9,6 (0)	44,4 (50,0)
Suomenojan hiilipölytuhka	0,7	37,0	16,1 (0)	44,6 (53,4)
Suomenojan leijupetituhka	0,8	41,9	3,5 (0)	53,2 (55,1)



Kuva 5.14. Martinlaakson hiilipölytuhkan normaalivoima-leikkausjännitys – kuvaajat pienellä rasialeikkauskojeella määritettynä.



Kuva 5.15. Suomenojan hiilipölytuhkan normaalivoima-leikkausjännitys – kuvaajat pienellä rasialeikkauskojeella määritettynä.



Kuva 5.16. Suomenojan leijupetituhkan normaalivoima-leikkausjännitys – kuvaajat pienellä rasialeikkauskojeella määritettynä.

5.2.7 Kokoonpuristuvuus

Martinlaakson ja Suomenojan hiilipölykattilan pohjatuhkan kokoonpuristuvuusominaisuuksia mitattiin Rowen ödometrillä. Tulosten perusteella hiilipölytuhka käyttäytyy puristettaessa kuten karkea siltti.

Jännitys-muodonmuutosparit on esitetty taulukossa 5.11 ja kuvaajina liitteessä 13.

Näytekappaleiden kuivatilavuuspaino (γ_d) ja tiivysaste (D) on esitetty taulukossa 5.12.

Taulukko 5.11. Martinlaakson hiilipölytuhkan, Suomenojan hiilipölytuhkan ja Suomenojan leijupetituhkan kokoonpuristuvuustulokset mitattuna Rowen ödometrillä.

	Martinlaakson hiilipölytuhka	Suomenojan hiilipölytuhka
σ_1 [kPa]	ε_1 [%]	ε_1 [%]
20	0,00	0,87
40	0,62	1,72
80	1,30	2,64
120	1,68	3,39
160	2,00	4,08
200	2,24	4,83
240	2,55	5,56

Taulukko 5.12. Martinlaakson hiilipölytuhkan ja Suomenojan hiilipölytuhkan ödometrikoekappaleiden kuivatilavuuspaino ja tiiviysaste ennen koetta.

	Martinlaakson hiilipölytuhka	Suomenojan hiilipölytuhka
Kuivatilavuuspaino γ_d	7,8 kN/m ³	5,9 kN/m ³
Tiiviysaste D	77 %	59 %

5.2.8 Vedenläpäisevyys

Mittaustulokset on esitetty taulukossa 5.13.

Taulukko 5.13. Martinlaakson hiilipölytuhkan, Suomenojan hiilipölytuhkan ja Suomenojan leijupetituhkan vedenläpäisevyyskokeiden tulokset.

Mittausmenetelmä	Martinlaakson hiilipölytuhka [m/s]	Suomenojan hiilipölytuhka [m/s]	Suomenojan leijupetituhka [m/s]
Vakioputouskoe	$9,01 \times 10^{-5}$	$3,33 \times 10^{-5}$	$6,33 \times 10^{-3}$
Muuttuvapaineinen	$1,45 \times 10^{-6}$	$3,25 \times 10^{-6}$	-

Mittausmenetelmän voidaan havaita vaikuttavan kokeen lopputulokseen. Tässä tapauksessa vakioputouskoetta voidaan pitää luotettavampana, koska muuttuvapaineinen vedenläpäisevyyskoe ei sovellu hyvin vettä läpäisevälle materiaalille.

Hiilipölykattilan pohjatuhka läpäisee vettä huonommin kuin rakeisuudeltaan vastaavat luonnonkiviainekset. Tämä johtuu tuhkarakeiden huokoisesta pinnasta ja särmikkäisistä reunoista, jotka lisäävät veden vastusta. [Viatek Oy 2001].

5.2.9 Kapillaarisuus

Martinlaakson hiilipölytuhkan ja Suomenojan hiilipölytuhkan kapillaarinen nousukorkeus on esitetty taulukossa 5.14.

Materiaalia voidaan pitää routivana jos kapillaarinen nousukorkeus on ≥ 1 m [Rantamäki et al. 1992]. Tulosten perusteella materiaaleja voidaan pitää routimattomana. Kapillaarimetrimin tuloksia pidetään routivuuden suhteen määräävänä, mikäli materiaalin rakeisuuskäyrästä tulkittu routivuus on ristiriitainen.

Taulukko 5.14. Martinlaakson hiilipölytuhkan ja Suomenojan hiilipölytuhkan kapillaarinen nousukorkeus.

	Martinlaakson hiilipölytuhka	Suomenojan hiilipölytuhka
Kapillaarinen nousukorkeus [m]	0,50	0,30

5.2.10 Puristuslujuus

ICT-kiertotiivistimellä tiivistetyt koekappaleet valmistettiin aluksi proctor-kokeella määritetyissä optimivesipitoisuuksissa. Koekappaleet kuitenkin murenivat heti ICT-muotista poistettaessa ja puristukset jouduttiin tekemään suuremmalla vesipitoisuudella.

Koekappaleiden valmistuksessa tavoiteltiin proctor-kokeella määritettyä maksimikuiva-tilavuuspainoa (tiiviysaste 100 %). Hiilipölytuhkien osalta tavoite jäi täyttymättä johtuen

optimivesipitoisuutta suuremmasta vesipitoisuudesta tai menetelmien välisistä eroista. Hiilipölytuhkien tiiviysaste oli 87–89 % ja leijupetituhkan noin 103 %. Puristuslujuudet on esitetty taulukossa 5.15. Puristuslujuusmittauksiin ja proctor-kokeeseen liittyvät tiedot, kuten optimivesipitoisuus, kuivatilavuuspaino ja tiiviysaste on esitetty liitteessä 14.

Taulukon 5.15 puristuslujuusmittauksista voidaan todeta Martinlaakson hiilipölytuhkasta valmistetun koekappaleen lujittuneen vähäisessä määrin. Suomenojan voimalaitoksen pohjatuhkat eivät lujittuneet. [Lohja Rudus 2006b].

Taulukko 5.15. Martinlaakson hiilipölytuhkan, Suomenojan hiilipölytuhkan ja Suomenojan leijupetituhkan puristuslujuudet [Lohja Rudus 2006b].

Puristuslujuus (MPa)	7 d	28 d	91 d
Martinlaakson hiilipölytuhka	0,19	0,29	0,31
Suomenojan hiilipölytuhka	0,25	0,27	0,25
Suomenojan leijupetituhka	-	0,22	0,19

6. Tuhkaparametrit ja -rakentaminen

6.1 Pohjatuhka

6.1.1 Kirjallisuudessa esitetyt parametrit

Osana tätä työtä on laadittu ohjeet pohjatuhkan maarakennuskäytölle. Ohjeessa käytettyjen parametrien luotettavuuden varmistamiseksi on käyty läpi kirjallisuudessa esitetyjä pohjatuhkan parametreja.

Pohjatuhkalle on Suomessa Helsingin Energian pohjatuhkaan keskittyneet ohjeet [Helsingin Energia, Viatek Oy 2001] sekä muita raportteja koskien kivihiilen lentotuhkaa ja pohjatuhkaa. Parametrivertailuun on otettu mukaan seuraavat julkaisut:

- Pohjatuhka 2001 [Helsingin Energia, Viatek Oy 2001],
- Tuhkan maarakentamisohje [Viatek Oy 2000],
- Tuhkarakentamisohje [Finergy 2000],
- Helsingin kaupungin tuhkarakentamisohje 2001 [Helsingin kaupunki 2001],
- Tuhkaprojekti loppuraportti [Havukainen et al. 1987],
- Talonrakennuksen maarakenteet [RIL 132–2000],
- Recycled materials for Embankment Construction [Vipulanandan, Basheer 1998].

Pohjatuhkaparametrien vertailu on esitetty taulukossa 6.1.

Taulukko 6.1. Pohjatuhkan parametrivertailu.

Pohjatuhka	Tuhkan maa- rakentamisohje [Viatak Oy 2001]	Tuhkarakenta- misohje [Finergy 2000]	Helsingin kaupungin tuhkarakentamisohje [Helsingin kaupunki 2001]	Tuhkaprojektin loppuraportti [Havukainen et al 1987]	Talonrakennuksen maarakenteet [RIL 132-2000]	Recycled materials for Embankment Construction [Vipula- nandan, Basheer 1998]	Pohjatuhka 2001 [Helsingin Energia, Viatak Oy 2001]
Rakeisuus	1,5-5 mm	1,5-5 mm	0,074-16 mm	0,074-20 mm		0,08-10 mm	0,074-16 mm
Lujittuminen	ei lujitu / vähäisestä	ei lujitu	ei lujitu / vähäistä	ei lujitu			
Routivuus							routimaton
Optimiviesipitoisuus	15-24 %	15-24 %	15-24 %	12-15 %	20-24 %	26 %	20-24 %
Maksimikuivatilavuus- paine	12-15 kN/m ³	12-15 kN/m ³	12-15 kN/m ³	12-15 kN/m ³	15-15,5 kN/m ³	15 kN/m ³	12-15 kN/m ³
E-moduuli (mitoitus)	70 MPa	50-100 MPa	50-100 MPa (80 MPa)				80 MPa
Kitkakulma (mitoitus)	39-53°		39-53°	42°	39-53°	45°	39-53° (42°)
Koheesio (mitoitus)	5-79 kPa		5-79 kPa	15 kPa	5-79 kPa	41 kPa	5-79 kPa (15 kPa)
Vedenläpäisevyys	10 ⁻⁴ -10 ⁻⁶ m/s	10 ⁻⁴ -10 ⁻⁶ m/s	10 ⁻⁴ -10 ⁻⁶ m/s	1-3 x 10 ⁻⁶ m/s	1-3 x 10 ⁻⁶ m/s		1-3 x 10 ⁻⁶ m/s
Lämmönjohtavuus	0,7-1,0 W/mK	0,9 W/mK	0,7-1,0 W/mK		0,7-1,0 W/mK		0,9 W/mK
Kapillaarisuus	< 0,8 m		< 0,8 m	< 0,8 m	< 0,8 m		< 0,8 m

6.1.2 Kirjallisuudessa esitetyt rakentamisohjeet

Pohjatuuhkaa on kirjallisuudessa ohjeistettu käytettäväksi seuraavissa maarakenteissa [Helsingin Energia, Viatek Oy 2001]:

- katujen ja kevyenliikenteen jakavakerros (alempiluokkaiset rakenteet),
- katujen ja kevyenliikenteen suodatinkerros
- kenttärakenteet,
- arinarakenteet,
- täytöt.

Pohjatuuhka varastoidaan pääasiassa avokasassa voimalaitoksen pihalla tai työmaiden läheisyydessä. Avovarastoinnissa tuhkan ylimääräinen kosteus poistuu ja parantaa siten rakentamista ja tiivistettävyyttä. Kesällä ja kuivalla säällä varastokasaa tulee tarvittaessa kastella pölyämisen estämiseksi. [Helsingin Energia, Viatek Oy 2001]. Pohjatuuhkaa voidaan varastoida myös lietealtaassa tai avosäiliössä [TFHRC 2002], jolloin auringon kuivattava vaikutus, rankkasateet ja kova tuuli ei aiheuta huolta tuhkan leviämisestä ympäristöön. Pohjatuuhkan varastointia lietealtaassa ja avosäiliössä on toteutettu pääasiassa ulkomailla, kuten Yhdysvalloissa ja Malesiassa [TFHRC 2002; Muilu & Jokinen 2006]. Suomen olosuhteissa avokasassa varastointi on ollut selvästi yleisin vaihtoehto.

Pohjatuuhkaa ei saa sijoittaa I–II -luokan pohjavesialueelle. Pohjatuuhkarakenne on peitettävä kiviaineksella tai päällystettävä esimerkiksi asfaltilla. Yksityiskohtaisemmat ohjeet nykyaikaiselle pohjatuuhkan käytölle Suomessa on esitetty Valtioneuvoston asetus eräiden jätteiden hyödyntämisestä maarakentamisessa (liite 4). [VNa 591/2006].

Pohjatuuhkalla rakentaminen tehdään pääasiassa samoin menetelmin kuin luonnon kiviaineksia käytettäessä. Pohjatuuhkarakenne suositellaan tiivistettävän 90–95 % tiiviyyteen. Materiaali levitetään korkeintaan 0,3–0,4 m kerroksina ja tiivistetään vähintään 6–8 yliajokertaa [Helsingin Energia, Viatek Oy 2001]. Pohjatuuhka on hyvin tiivistyvä materiaali ja se voidaan tiivistää laajalla vesipitoisuusalueella. Tiivistetyn kerroksen paksuus on noin 0,7–0,8 kertaa alkuperäinen paksuus [Finergy 2000]. Levitykseen ja tiivistykseen voidaan käyttää tavanomaista maarakennuskalustoa. Rakenteen laadunvalvonta tehdään kohdekohtaisesti kuten luonnon kiviaineksille.

Pohjatuhkan korroosio-ominaisuudet on huomioitava rakennetta suunniteltaessa. Pohjatuhka ei sovellu käytettäväksi valuraudan, teräksen eikä alumiinin kanssa voimakkaan syöpymisen johdosta. Sen sijaan kupari, lyijy, betoni ja muovi kestävät tuhkakäytössä [Helsingin Energia, Viatek Oy 2001].

Tiivistetty pohjatuhkakerros tulee peittää mahdollisimman pian seuraavalla rakennekerroksella pölyämisen estämiseksi ja suojaan suoralta mekaaniselta rasitukselta [Helsingin Energia, Viatek Oy 2001].

Annettuja työohjeita noudattamalla voidaan pohjatuhkasta rakentaa toimivia maarakenteita. SGY:n uusiomaamateriaalitiedostoista [SGY 2007] ei juuri löydy epäonnistuneita, pohjatuhkan käytöstä johtuneita maarakenteita. Ongelmia on aiheuttanut suunniteltuun rakenteeseen kohdistuneet liian suuret kuormitukset, kuten Helsingin Kurkimäen ja Karpalotien alueella sekä puutteellisesta tiedonkulusta johtunut korroosiotapaus valurautaputkirakenteessa Helsingin Torpparinmäellä [Havukainen 2007].

6.2 Lentotuhka

6.2.1 Kirjallisuudessa esitetyt parametrit

Lentotuhkaa käsittelevää kirjallisuutta on julkaistu paljon sekä suomalaisten toimesta että ulkomailla. Monet tahot ovat julkaisseet oman sivutuotteisiin tai tuhkaan erikoistuneen ohjeen edistämään sivutuotteiden käyttöä maarakentamisessa. Lentotuhkalle esitetyjä parametreja on koottu vertailuun 2000-luvun kattavimmista raporteista ja muutamasta vanhemmasta teoksesta. Seuraavat julkaisut ovat lentotuhkan parametrivertailussa mukana ja toimineet siten perustana Lohja Rudukselle laadituille lentotuhkan maarakennusohjeille:

- Tuhkan maarakentamisohje [Viatek Oy 2000],
- Tuhkarakentamisohje [Finergy 2000],
- Helsingin kaupungin tuhkarakentamisohje 2001 [Helsingin kaupunki 2001],
- Tuhkaprojekti loppuraportti [Havukainen et al. 1987],

- Talonrakennuksen maarakenteet [RIL 132–2000],
- Recycled materials for Embankment Construction [Vipulanandan, Basheer 1998].

Lentotuhkaparametrien vertailu on esitetty taulukossa 6.2.

Taulukko 6.2. Lentotuhkan parametrivertailu.

Lentotuhka	Tuhkan maa- rakentamisolje [Viatek Oy 2001]	Tuhkarakenta- misohje [Finergy 2001]	Helsingin kaupungin tuhkarakentamisolje [Helsingin kaupunki 2001]	Tuhkaprojektin loppuraportti [Havukainen et al 1987]	Talonrakennuksen maarakentect [RIL 132-2000]	Recycled materials for Embankment Construction [Vipula- nandan, Basheer 1998]
Rakeisuus	0,002-0,1 mm	0,002-0,1 mm	0,002-0,1 mm	0,005-1 mm		0,004-2 mm
Lujittuminen	siilovarastoitu lujittuu	siilovarastoitu lujittuu		kyllä		
Routivuus	routivaa		routivaa			
Optimiviesipitoisuus	18-25 %	18-25 %	18-25 %	14-28 % (lujittumaton 19-21 %)	18-24 %	10-12 %
Maksimikuivatilavuus- paino	12-15 kN/m ³	12-15 kN/m ³	12-15 kN/m ³	12-16 kN/m ³ (lujittu- maton 10-15 kN/m ³)	13-15 kN/m ³	18-21 kN/m ³
Puristuslujuus 7d				0,4 MPa		
Puristuslujuus 28d	0,5-1,5 MPa		0,5-1,5 MPa	3 MPa (tiiviyaste 91 %)		
E-moduuli siilov./kasav.	200 MPa / 70 MPa	150-350 MPa / 50-150 MPa	200 MPa / 70 MPa			
Kitkakulma	49-77°	49-77°	49-77°	28-36°	30-35°	39-61°
Koheesio	70-490 kPa	64-490 kPa	70-490 kPa	23-49 kPa	30-50 kPa	21-193 kPa
Vedenläpäisevyys	10 ⁻⁶ -10 ⁻⁷ m/s	10 ⁻⁶ -10 ⁻⁷ m/s, lujittu- neena 10 ⁻⁶ -10 ⁻⁸ m/s	10 ⁻⁶ -10 ⁻⁷ m/s	10 ⁻⁶ -10 ⁻⁷ m/s, lujittu- neena 10 ⁻⁷ -10 ⁻⁹ m/s	10 ⁻⁷ -10 ⁻⁸ m/s	10 ⁻⁵ -10 ⁻⁸ m/s
Lämmönjohtavuus	0,4-1,0 W/mK	0,6-0,7 W/mK	0,4-1,0 W/mK			
Kapillaarisuus	1,8-2,2 m		1,8-2,2 m	2,0-3,5 m (lujittumaton <1,0 m)		

6.2.2 Kirjallisuudessa esitetyt rakentamisohjeet

6.2.2.1 Soveltuvuus

Lentotuhkaa voidaan käyttää seuraavissa maarakenteissa [Finergy 2000]:

- kadun ja tien rakennekerrokset
 - kantava kerros (ainoastaan poikkeustapauksissa kevyesti liikennöidyillä kaduilla, teillä ja kevyenliikenteenvälillä)
 - jakava kerros (lujittuvat tuhkat)
 - pengertäyte
- kenttärakenteet (kuten kadun ja tien rakennekerroksissa),
- pengertäytöt ja muut täytöt,
- putkikaivantojen arinat ja täytöt (lujittuvaa lentotuhkaa ei saa sijoittaa putkien päälle).

Lentotuhkakerrokseen ei saa rakentaa salaojia, koska tuhka voi liettyä liikaa kostuessaan [Finergy 2000]. Lujittuva lentotuhka soveltuu huonosti toistuvasti auki kaivettaviin kohteisiin, kuten putkijohtokaivantoihin, sillä lujittuva lentotuhka vaikeuttaa myöhemmässä vaiheessa esiin kaivamista mahdollisten korjaustöiden yhteydessä [Helsingin kaupungin kiinteistövirasto 1983].

Vaikka monessa julkaisussa mainitaan lentotuhkan käyttökelpoisuus päällysrakenteen kantavassa kerroksessa heti kulutuskerroksen alla, on olemassa myös varoittavia esimerkkejä epäonnistuneista tapauksista. Sipoon Knuters – Östersundom paikallistiellä rakennettiin tuhakoerakenteita vuonna 1997. Osa rakenteista toteutettiin käyttämällä stabiloimatonta tuhkaa ohuen (0–55 mm) kantavan murskekerroksen alla. Osalla aluetta tuhkan päällä oli ainoastaan sorapintausta ja bitumiemulsio. [SCC Viatek Oy 2001a].

Keväällä 2001 havaitut vauriot, kantavuuden aleneminen ja tien pinnan pettäminen olivat pahimmat LT+RPT (75 % + 25 %) – osuudella, jossa ei käytetty mursketta tuhkakerroksen päällä. Vaurioita esiintyi myös koerakenneosuuksilla, joissa ohuella murskekerroksella päällystettyä lentotuhkaa oli käytetty pengertäytteen ja pohjamaan päällä. Vaurioitumisen syiksi todettiin riittämätön rakenteen kuivatus ja tuhkakerroksen kuormituk-

seen nähden alhainen lujuus. Keväällä, jolloin tien keskiosa sulaa nopeammin kuin reumat ja vettä huonosti läpäisevä tuhkerakkerros sekä routakerros pidättävät vettä, tien pinnan kuormituskestävyys vähenee. Päälysrakenne suunniteltiin päällystettäväksi AB-kerroksella, mutta päällystettä ei rakennettu ennen vaurioiden havaitsemisajankohtaa, joka vaikuttaa oleellisesti kantavuuteen. [SCC Viatek Oy 2001a].

Knuters-Östersundom paikallistien koerakenteiden perusteella lentotuhkakerroksen päällä tulisi käyttää 150–200 mm kantavaa kerrosta ennen kulutuskerrosta. [SCC Viatek Oy 2001a].

Lentotuhka soveltuu myös vaativan tierakennuskohteen rakennusmateriaaliksi, mikäli suunnitelmat ja työselitys ovat riittävän yksityiskohtaisia. Porin satamatie rakennettiin tuhkarakenteisena, käsittäen 550 m maantiesuutta, 110 m yksityistiesuutta ja 60 m paikallistiesuutta. Kaikki tieosuudet ovat raskaan liikenteen kuormittamia ja kuuluvat päällysrakenneluokkaan 2 AB. [Lindholm 1997]. Tieosuuksien tuhkarakenteet on esitettynä taulukoissa 6.3 ja 6.4.

Levykuormituskokeiden perusteella tuhkarakenteet saavuttivat tavoitekantavuuden erittäin varhaisessa vaiheessa (50 % mittapisteistä jo 3 vrk:n kuluttua ja 67 % mittapisteistä 10 vrk:n kuluttua). Jakavan kerroksen tavoitekantavuus tuhkarakenteella oli 403 MPa ja Tielaitoksen asettama kantavuusvaatimus tavanomaiselle rakenteelle oli 160 MPa. [Lindholm 1997].

Taulukko 6.3. Porin satamatien maantiesuuden tuhkarakenteen kuvaus [Lindholm 1997].

Maantiesuus	Materiaali	Kerrospaksuus	E-moduuli
Jakava kerros	sementtistabiloitu lentotuhka	0,25 m + 0,25 m	400 MPa

Taulukko 6.4. Porin satamatien paikallis- ja yksityistieosuuden tuhkarakenteiden kuvaus [Lindholm 1997].

Paikallis- ja yksityistieosuus	Materiaali	Kerrospaksuus	E-moduuli
Kantava kerros	sementtistabiloitu pohja- ja lentotuhkan seos	0,20 m	2500 MPa
Jakava kerros	sementtistabiloitu lentotuhka	0,25 m + 0,25 m	400 MPa

Porin satamatien seurantamittauksissa vuosina 1998–2001 on havaittu routimisesta aiheutuneita epätasaisuuksia ja halkeilua sekä kantavuuden lievästi alenevaa trendiä. Maantien tuhkarakenteen tasaisuus oli keväällä 2001 keskimäärin tyydyttävä ja kesällä hyvä. [Juvankoski & Kivikoski 2001].

Myönteisiä kokemuksia lentotuhkalla rakentamisesta on saavutettu esimerkiksi Herttoniemen rannassa, Sorsavuorenraitilla. Sorsavuorenraitti toteutettiin vuosina 1996–1997 ja tuhkarakenne koostui lentotuhkan ja rikinpoistotuotteen sekoituksesta jakavassa kerroksessa ja/tai suodatinkerroksessa. Osassa koeosuuksia käytettiin myös sementtiä sideaineena. Lähes kaikkien tuhkarakenteiden keskiarvokantavuudet olivat vuoden 2000 seurantamittauksissa suuremmat kuin kaksi vertailurakennetta. [SCC Viatek Oy 2001c]. Muita onnistuneita lentotuhkalla rakennettuja kohteita on lueteltu SGY:n uusiomateriaalitiedostossa. Esimerkiksi Helsingin Karpalotien kohteen on todettu onnistuneen erittäin hyvin. [SGY 2007].

6.2.2.2 Suunnittelu

Lentotuhkarakenteet tehdään kuivalle ja tasaiselle alustalle. Lentotuhka voi liettyä joutuessa löyhänä veden kanssa tekemisiin. Pohjalle on tarvittaessa levitettävä suodatinkerros ja vaativissa kohteissa myös suodatinkangas. Ennen tuhkakerroksen levittämistä on varmistuttava riittävästä sivuttaistuesta tiivistysvaiheessa. Reunatuot voidaan muotoilla ja tiivistää rakennuspohjan tasaamisen yhteydessä. [Finergy 2000].

Lentotuhkan lämmöneristävyysominaisuuksiin on syytä kiinnittää huomiota mitoitettaessa ohuita kerrospaksuuksia. Helsingin Torpparinmäen kevyenliikenteen- ja pysäköintialueen rakenteissa havaittiin painumia vuonna 1981. Rakenteiden painumat johtuivat lentotuhkakerroksen alapuolisen savikerroksen jäätymisestä ja sulamisesta. Savi on päässyt jäätymään, koska katualueet on pidetty talvisin aurattuna. [SGY 2007].

6.2.2.3 Varastointi

Lentotuhkaa voidaan varastoida kuivana siilossa tai kosteana avokasassa voimalaitoksen pihalla tai muulla ympäristöluvan saaneella alueella. Siilossa varastoitua tuhkaa pidetään yleensä lujittuvana ja kasavarastoitua lujittumattomana tai vain vähän lujittuvana. [Finnergy 2000]. Avokasassa varastoidun lentotuhkan lujittumisominaisuus on sitä vähäisempää, mitä kauemmin (< 6 kk) tuhkaa on varastoitu ulkoilmassa kosteissa olosuhteissa [Lahtinen 2001]. Lentotuhkaa varastoituna avokasoissa on esitettyä kuvassa 6.1.



Kuva 6.1. Lentotuhkaa varastoituna avokasoissa auman muodossa. [Kuva: Ramboll Luopioinen / SGT].

6.2.2.4 Levittäminen ja tiivistäminen

Kostea tuhka tuodaan työmaalle kuorma-autolla. Levittäminen ja tiivistäminen voidaan tehdä tavanomaisella maarakennuskalustolla [Finergy 2000]. Rakennuskohde ei saa sijaita I- tai II-luokan pohjavesialueella, eikä tuhkaa saa levittää avoveteen.

Käytännön kokemusten mukaan löyhänä lentotuhkarakennekerroksen paksuus on 1,5-kertainen verrattuna tiivistettyyn kerrokseen. Rakennekerrokset tiivistetään noin 0,20–0,25 m kerroksina (löyhänä 0,30–0,40 m). Tiivistys voidaan tehdä kohteesta riippuen valssijyrällä, tärylevyllä tai hydraulitäryllä. Tuhkarakenne voidaan tiivistää myös ohuen murskekerroksen päältä paremman tiivistymisen saavuttamiseksi. Tiivistyskertojen määrä arvioidaan tapauskohtaisesti. Tuhkakerroksen pinta tulee olla vähintään 3 % kalteva, jotta sadevedet valuisivat kerroksen päältä pois [Finergy 2000].

Suunnittelemattoman lentotuhkarakentamisen ja liian paksujen tiivistyskerrosten tekeminen voi johtaa ei-toivottuun lopputulokseen. Helsingin Maunulassa 1982 korjattiin ulkoilutien lentotuhkarakennetta, joka oli ensimmäisen talven aikana menettänyt täysin kantavuutensa, johtuen sulamis- ja kapillaariveden imeytymisestä löyhäksi jääneeseen rakenteeseen. [SGY 2007].

Lentotuhkarakenne tulee suojata mahdollisimman pian levittämisen ja tiivistämisen jälkeen ohuella murskekerroksella tai käyttämällä porrastettua rakennustapaa. [Finergy 2000].

6.2.2.5 Laadunvalvonta

Lentotuhkarakenteen laadunvalvonta suoritetaan kohdekohtaisesti kuten luonnon kiviaineksia käytettäessä. Tiivistystyön laadunvalvonta voidaan tehdä käyttäen Volymetria, Loadman-pudotuspainolaitetta tai lentotuhkalle kalibroitua Troxler-mittalaitetta. [Finergy 2000]. Kantavuusmittalaitteilla tiiviysastetta arvioitaessa tulee tiiviyssuhteen olla levykuormituslaitteella $E_2/E_1 < 2,2$ ja pudotuspainolaitteella $E_2/E_1 < 1,9$ [InfraRYL 2007].

7. Betonimurskeparametrit

7.1 ”Betonimurskeen mitoitusparametrit” – raportissa esitetyt parametrit

”Betonimurskeen mitoitusparametrit” –raportti [Viatek Oy 1999] on toiminut perustana 2000-luvulla julkaistuille betonimurskeen rakennus- ja suunnitteluohjeille ”Betonimurske kadun päällysrakenteissa 2000” [Suomen Kuntaliitto 2000] ja ”Betonimurskeen käyttö tien päällysrakennekerroksissa” [Tiehallinto 2000]. Raportissa esitetyt betonimurskeen mitoitusparametrit ovat edelleen käytössä Suomessa.

”Betonimurskeen mitoitusparametrit”– raportissa on esitetty parametrit betonimurskeen neljälle eri laatuluokalle: BeM I, BeM II, BeM III ja BeM IV. Laatuluokkien jaon määrittelee betonin puhtausaste. Betonimurskeluokkien jaon perusteet on esitetty taulukossa 7.1.

Taulukko 7.1. Betonimurskeen laatuluokkien jaottelun periaate [Viatek Oy 1999].

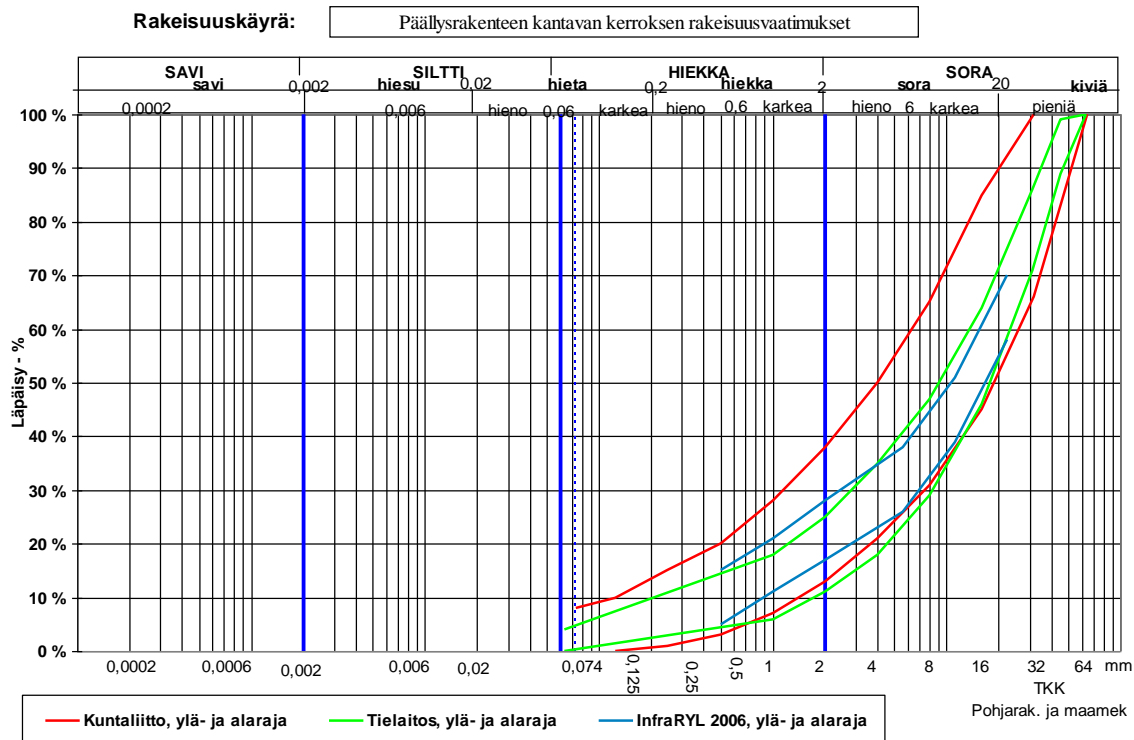
Betonimurskeluokka	Raaka-aine	Epäpuhtaudet [paino-%]	
		Tiili	Muu materiaali
BeM I	betoniteollisuus	0	0,5
BeM II	purkutyömaat	10	1
BeM III	purkutyömaat	10	1
BeM IV	purkutyömaat	30	1

BeM I sisältää vain puhdasta betonimursketta elementtitehtaalta. BeM II ja III ovat peräisin pääasiassa purkutyömailta ja sisältävät tiiltä sekä muita epäpuhtauksia. Luokkien erona on BeM III:n epävarma lujittuminen ja siten myös alhaisempi E-moduuli. BeM IV voi sisältää tiiltä maksimissaan 30 % ja on mahdollisesti routivaa. Oletuksena pidetään betonimurskeen puhtautta ympäristölle ja terveydelle haitallisista aineista, lujittumista ja routimattomuutta edellä mainittuja poikkeuksia lukuun ottamatta. [Viatek Oy 1999].

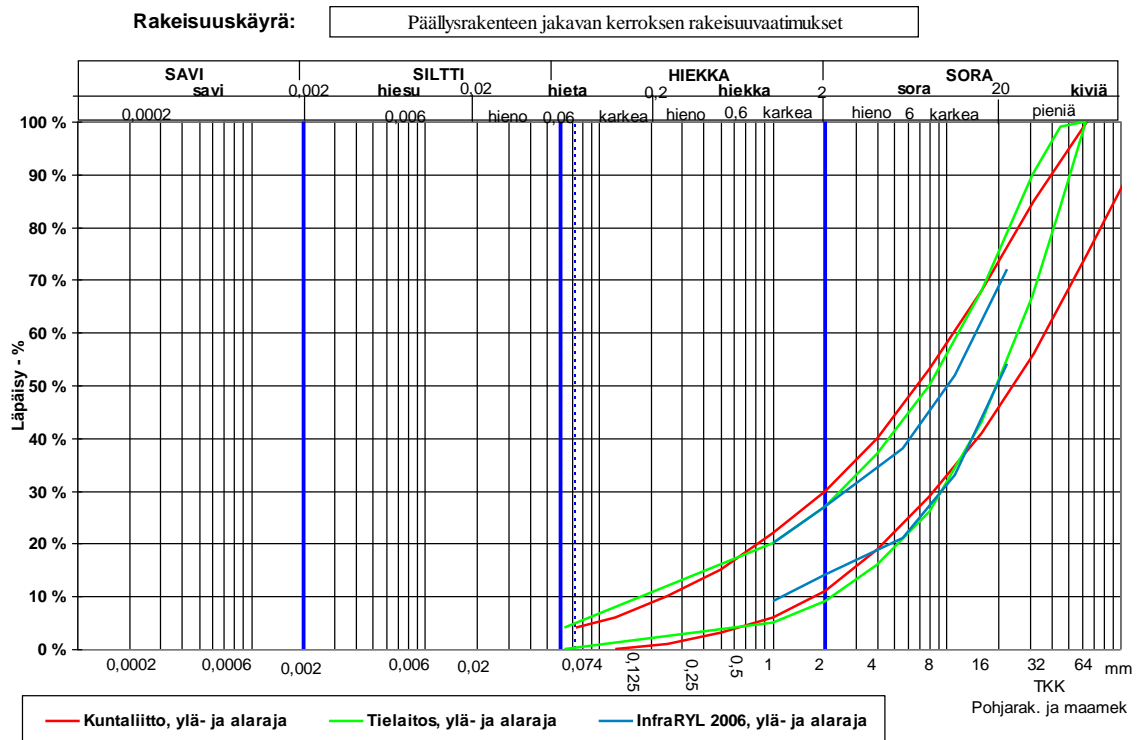
Käytännössä suurin osa Suomessa maarakennukseen saatavilla olevasta betonimurskeesta kuuluu luokkiin BeM II ja III. BeM I betonimursketta hyödynnetään maarakentamisen lisäksi myös betoniteollisuudessa, mutta toiminta ei ole Suomessa kannattavaa ja siksi määrällisesti vähäistä suhteessa maarakennuskäyttöön [Ilama 2007]. Tehokkaalla lajittelevalla purkutekniikalla pyritään laadullisesti parempiin BeM II- ja BeM III-luokkiin. BeM IV-luokan betonimursketta valmistetaan, mikäli parempiin luokkiin ei päästä. [Määttänen 2007].

Päällysrakenteen kantavan ja jakavan kerroksen murskeelle on viime vuosilta olemassa kolme erilaista rakeisuusvaatimusta. Kuntaliiton, Tielaitoksen ja InfraRyl 2006:n määrittelemät rakeisuusohjealueet on esitetty kuvissa 7.1 ja 7.2. Murskeen rakeisuusvaatimusta voidaan soveltaa myös betonimurskeelle päällysrakenteessa, koska betonimurske pyritään murskaamaan ohjealueen rakeisuuteen. Kuvien 7.1 ja 7.2 kantavan ja jakavan kerroksen rakeisuusohjealue on vaihtelualueen sisempi vaihtoehto, jota käytetään kuvaamaan materiaalin tyyppirakeisuutta eli toteutuneen rakeisuuden keskiarvoa. Yksittäinen mitattu rakeisuus voi olla alueen ulkopuolella. Yksittäisen poikkeaman rakeisuusohjealueet määritellään erikseen edellä mainituissa julkaisuissa.

Betonimurskeelle Suomessa käytetyt mitoitusparametrit on esitetty taulukossa 7.2.



Kuva 7.1. Päälysrakenteen kantavan kerroksen murskeen rakeisuusvaatimukset. Kuvassa on esitetty sisempi vaihteluväli. [Suomen Kuntaliitto 2002, Tielaitos 1999, InfraRYL 2006].



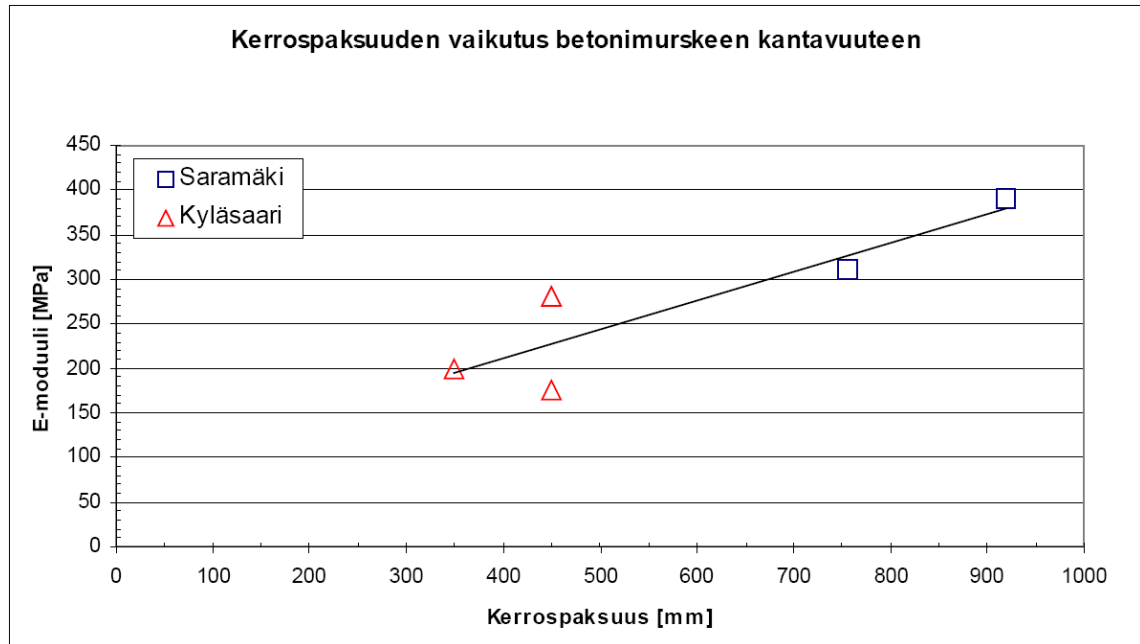
Kuva 7.2. Päälysrakenteen jakavan kerroksen murskeen rakeisuusvaatimukset. Kuvassa on esitetty sisempi vaihteluväli. [Suomen Kuntaliitto 2002, Tielaitos 1999, InfraRYL 2006].

Suomessa ja Hollannissa betonimurskeen lujittuminen voidaan huomioida rakenteen kantavuutta mitoitettaessa [Arm 2003]. Betonimurskeen kantavuuden takaisinlasketun E-moduulin voidaan todeta riippuvan betonimurskekerroksen paksuudesta. Kerrospaksuuden kasvaessa lujittuminen paranee. Kuvassa 7.3 on esitetty Saramäen ja Kyläsaaren koerakennuskohteen kantavuusmittaukset suhteessa betonimurskekerroksen (BeM II) paksuuteen rengasrouheen päällä. [SCC Viatek Oy 2002].

Rakenteesta kaivettu lujittunut betonimurske voidaan käyttää rakennusmateriaalina uudelleen. Lujittuneen betonimurskeen aukikaivu voidaan tehdä kynsikauhalla tai hydraulisesti kallistuvalla luiskakauhalla vaikeuksitta. Uudelleen tiivistettynä lujittuva betonimurske tulee saavuttamaan yli 70 % alkuperäisestä lujuudesta. [SCC Viatek Oy 2001c].

Taulukko 7.2. Betonimurskeen parametrivertailu.

Betonimurske	Betonimurskeen mitoitusparametrit [Viatak Oy 1999]				Uusiomateriaalit yhdyskuntien liikenne- väylien pehmeikkörakentamisessa [SCC Viatak Oy 2002]	Krossad betong i vägkonstruktioner [Vägverket 2004]	Unbound crushed concrete in high volume roads [Aurstad et al 2004]	Crushed concrete from building demolition [Pihl et al 2003]
Laatuluokka	BeM I	BeM II	BeM III	BeM IV	BeM I	BeM II	Gj1 I	A, B ja C
Rakaisuus	0-50 mm	0-50 mm	0-50 mm	vaihtelee	0-50 mm	0-50 mm	0-100 mm ja 20-100 mm	0-63 mm
Lujittuminen	lujittuu	lujittuu	vaihtelee	ei lujitu				Lujittuu mutta ei huomioida mitoituksessa
Routivuus	routimaton	routimaton	routimaton	vaihtelee				
Optimiviesipitoisuus	8-10 %	8-12 %			11 %	12,5 %	9,5-14 %	
Maksimikuivatilavuus- päämo	18-20 kN/m ³	17,5-20,5 kN/m ³			19,1 kN/m ³	18,1 kN/m ³	19,4-21,0 kN/m ³	
Puristuslujuus 7d	1,2-1,3 MPa	0,3-1,1 MPa			2,5 MPa	0,9 MPa		
Puristuslujuus 28d	2,0-2,1 MPa	0,6-1,3 MPa			3,3 MPa	1,1 MPa		
E-moduuli	700 MPa	500 MPa	280-300 MPa	<200 MPa	500-1000 MPa (hyvin kantava alempi kerros) ja 175-390 MPa (pehmeä alempi kerros)	450 MPa (Luokat 1 & 2), 250 MPa (Luokka 3) ja 150 MPa (Luokka 4)	350-450 MPa (# 0-63 mm), 400-650 MPa (# 20-63 mm)	400 MPa (A), 300 MPa (B) ja 200 MPa (C)
Kitkakulma					56° (0kk), 23° (3kk)		>44° - >49°	
Koheesio					30 kPa (0kk), 252 kPa (3kk)			
Vedenläpäisevyys	1-7 x 10 ⁻⁵ m/s							
Lämmönjohtavuus					1-2 W/mK	0,9-1,2 W/mK		
Haurausarvo	20-22	23-25						
Los Angeles-luku	22-24	27-29					25,7-27,3	≤35 (A), ≤40 (B), ei vaadita (C)



Kuva 7.3. Betonimurskekerroksen paksuuden vaikutus keskimääräiseen E-moduuliin. Saramäen ja Kyläsaaren käytettiin betonimursketta BeM II (# 0-50 mm) ja alapuolinen kerros oli rakennettu rengasrouheesta. [SCC Viatek Oy 2002].

7.2 Muussa kirjallisuudessa esitetyt betonimurskeen parametrit

7.2.1 Betonimurskeohjeistuksen vertailu

Suomessa käytössä olevia betonimurskeen mitoitusparametreja verrattiin Eurooppalaisiin ohjeisiin. Esimerkiksi Ruotsissa ja Tanskassa on käytössä kattavat ohjeet betonimurskeen käytölle maarakentamisessa. Norjassa on rakennettu osa raskaasti liikennöityä Eurooppatie E6 käyttäen elementtiteollisuuden betonimursketta ja käytetyt mitoitusparametrit on otettu mukaan vertailuun. Seuraavat betonimurskeohjeet ovat mukana taulukon 7.2 parametrivertailussa:

- Betonimurskeen mitoitusparametrit [Viatek Oy 1999],
- Uusiomateriaalit yhdyskuntien liikenneväylien pehmeikkörakentamisessa [SCC Viatek Oy 2002],
- Krossad betong i vägkonstruktioner [Vägverket 2004],
- Unbound crushed concrete in high volume roads [Aurstad et al. 2004],

- Crushed concrete from building demolition [Pihl et al. 2003].

Ruotsin, Tanskan ja Norjan käytäntö betonimurskeen laatuluokittelulle materiaalin puhautauden ja muiden ominaisuuksien perusteella on tarkasteltu luvuissa 7.2.2–7.2.4.

7.2.2 Ruotsin käytäntö

Ruotsissa betonimurske jaetaan neljään luokkaan taulukon 7.3 mukaisesti. Betonimurskeen lujuutta koskevat vaatimukset on esitetty taulukossa 7.4.

Taulukossa 7.3 esiintyvä C-arvo on standardin SFS-EN 206-1 mukainen betonin lujuusluokka [Ympäristöministeriö 2005]. K-arvo kuvaa betonin lujuusluokkaa, jossa lukuarvo tarkoittaa mitoituslujuuden (yksikkö MPa) suuruisen puristuksen kestäväää betonia [Rakennustuoteteollisuus RTT ry 2005]. Micro-Deval mittaa materiaalin kulutuskestävyyttä.

Ruotsissa käytetyt betonimurskeen mitoitusparametrit [Vägverket 2004] on esitetty taulukossa 7.2.

Missään Ruotsin betonimurskeluokassa ei sallita ympäristölle haitallisia aineita, kuten asbesti, PCB, PAH, elohopea tai vastaavia [NR&TR 2001].

Taulukko 7.3. Ruotsissa käytetyt betonimurskeen laatuluokat ja raaka-aineen synty sekä puhtausaste. [Vägverket 2004, Arm & Ydrevik 2001]

Betonimurske-luokka	Raaka-aine	Betoni [paino-%]	Epäpuhtaudet [paino-%]		
			tiili	kevyt- betoni	muu aines
Luokka 1	betoniteollisuus ja purkutyömaat	100	0	0	0
Luokka 2	purkutyömaat	95	5	1	0,5
Luokka 3	purkutyömaat	80	20	5	2
Luokka 4	purkutyömaat	50	50	50	10

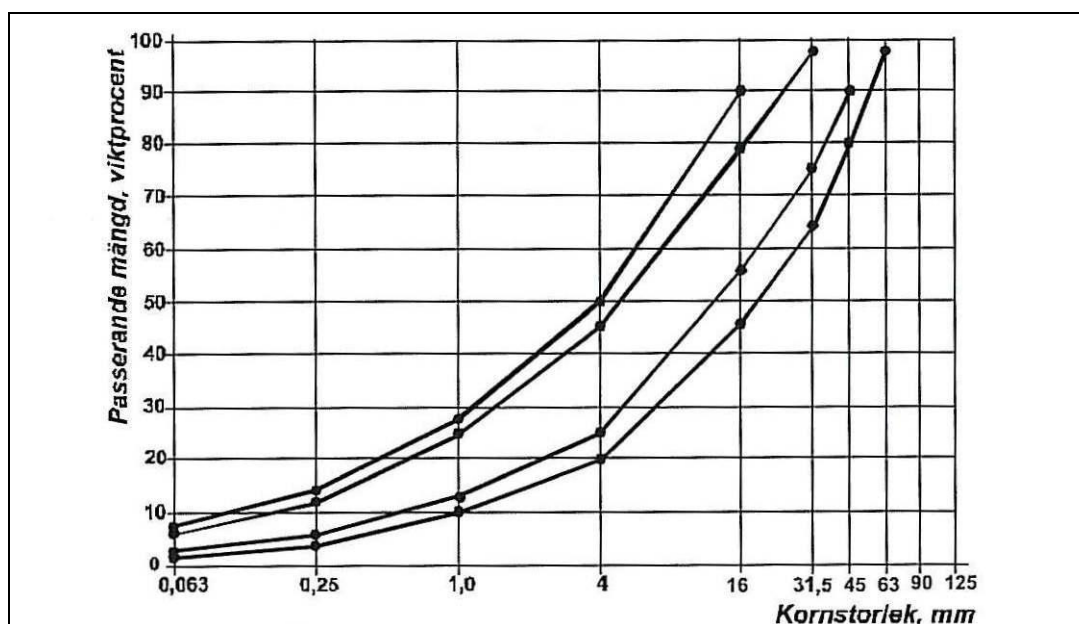
Taulukko 7.4. Ruotsin betonimurskeluokkien lujuutta koskevat vaatimukset [Vägverket 2004].

	C-arvo [MPa]	K-arvo [MPa]	Puristuslujuus [MPa]	Micro-Deval
Luokka 1	$\geq C 30/37$	$\geq K40$	≥ 30	= 25
Luokka 2	$\geq C 20/25$	$\geq K25$	≥ 20	= 35
Luokka 3	$\geq C 12/15$	$\geq K12$	≥ 10	= 50
Luokka 4	-	-	-	-

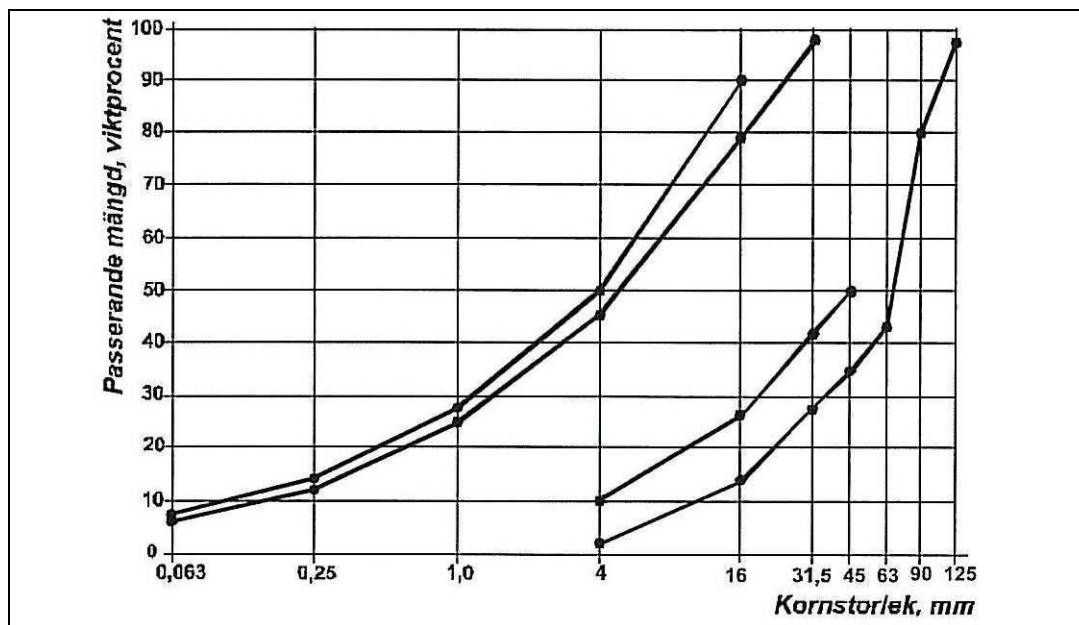
Ruotsissa betonimurske ohjeistetaan tiekohteissa käytettäväksi ensisijaisesti päällysrakenteen jakavassa kerroksessa ja toissijaisesti kantavassa kerroksessa. Paksummassa jakavassa kerroksessa betonin karbonatisoituminen lisää rakennekerroksen jäykkyyttä enemmän kuin ohuemmassa kantavassa kerroksessa. Kantava kerros on tavallisesti noin 80 mm paksu kun jakava kerros vähintään 420 mm. Toinen syy betonimurskeen suosimiseen jakavan kerroksen materiaaliksi on pienempi riski tiesuolan tunkeutumiselle betonimurskekerrokseen. Myös tuotannolliset syyt puoltavat betonimurskeen käyttöä jakavan kerroksen materiaalina, sillä kantavan kerroksen raekoostumus on hienojakoisempaa ja vaati siten enemmän murskausta tuottaen samalla enemmän rakennekerrokseen sovelumatonta hienoaainesta. [NR&TR 2001].

Ruotsin vaatimusten mukaiset kevyenliikenteen väylän kantavan kerroksen betonimurskeelle asetetut rakeisuusvaatimukset kunkin seulakoon ylä- ja alarajalle normaalilla (sisempi) ja maksimipoikkeamalla (ulompi) on esitetty kuvassa 7.4. Vertailukohtana on esitetty Tielaitoksen rakeisuusvaatimus [Tielaitos 1999] kantavan kerroksen murskeelle taulukossa 7.5.

Ruotsin jakavan kerroksen betonimurskeen rakeisuusvaatimukset kunkin seulakoon ylä- ja alarajalle normaalilla (sisempi) ja maksimipoikkeamalla (ulompi) on esitetty kuvassa 7.5. Vertailukohtana on esitetty Tielaitoksen [Tielaitos 1999] jakavan kerroksen murskeen rakeisuusohjealue.



Kuva 7.4. Rakeisuusvaatimus kantavan kerroksen betonimurskeelle kevyenliikenteen väylien rakenteena Ruotsin ohjeiden mukaisesti [Vägverket 2004].



Kuva 7.5. Päällysrakenteen jakavan kerroksen rakeisuusvaatimukset betonimurskeelle Ruotsin ohjeiden mukaisesti [Vägverket 2004].

Suomen ja Ruotsin päällysrakenteen betonimurskeen kantavan ja jakavan kerroksen rakeisuusvaatimusten vertailu ylä- ja alarajoihin on esitetty taulukoissa 7.5 ja 7.6

Taulukko 7.5. Ruotsin ohjeiden mukaiset betonimurskeen rakeisuusvaatimukset (kuva 7.4) kevyen liikenteen väylien kantavan kerroksen betonimurskeelle ja Tielaitoksen rakeisuusvaatimukset kantavan kerroksen murskeelle [Vägverket 2004, Tielaitos 1999].

	Vägverket 2004				Tielaitos 1999			
	Ulompi	Sisempi	Ulompi	Sisempi	Ulompi	Sisempi	Ulompi	Sisempi
mm	alaraja	alaraja	yläraja	yläraja	alaraja	alaraja	yläraja	yläraja
0,063	2	3	6	7	0	0	4	6
0,25	4	6	12	14				
1	10	13	25	28	3	6	18	22
2					7	11	25	30
4	20	25	45	50	13	18	35	40
8					23	29	47	53
16	46	56	79	90	39	46	64	71
31,5	64	75	98	-	62	71	86	95
45	80	90	-	-	80	89	99	100
63	98	-	-	-	100	100	-	-

Taulukko 7.6. Ruotsin rakeisuusvaatimukset (kuva 7.5) jakavan kerroksen betonimurskeelle ja Tielaitoksen vaatimukset jakavan kerroksen murskeelle [Vägverket 2004, Tielaitos 1999].

	Vägverket 2004				Tielaitos 1999			
	Ulompi	Sisempi		Ulompi	Ulompi	Sisempi		Ulompi
mm	alaraja	alaraja	yläraja	yläraja	alaraja	alaraja	yläraja	yläraja
0,063	-	-	6	7	0	0	4	6
0,25	-	-	12	14				
1	-	-	25	28	2	5	20	23
2					5	9	27	31
4	2	10	45	50	11	16	37	42
8					21	26	50	56
16	14	26	79	90	36	43	68	75
31,5	28	42	98	-	59	67	90	100
45	35	50	-	-	76	84	99	100
63	43	-	-	-	95	100	100	100
90	90	-	-	-	100	-	-	-
125	98	-	-	-	-	-	-	-

7.2.3 Norjan käytäntö

Norjassa betonimurskeet jaetaan kahteen luokkaa, puhtaaseen betonimurskeeseen ja betonimurskesekoitukseen, joka sisältää myös laastia ja luonnonkiviaineksia. Laatuluokkien materiaalikoostumukselliset perusteet on esitetty taulukossa 7.7. [Gjenbruksprosjekter 2005].

Betonimurskeluokkien Gjb I ja Gjb II soveltuvuus maarakennuskohteisiin sitomattomana materiaalina on esitetty taulukossa 7.8.

Taulukko 7.7. Norjan betonimurskeluokkien vaatimukset sitomattoman rakennekerroksen rakennusmateriaaliksi [Gjenbruksprosjektet 2005, Statens vegvesen 2005].

	Gjb I Betonimurske [paino-%]	Gjb II Materiaalisekoitus [paino-%]
Betonimurske ja/tai luonnonkiviaines	> 94 %	-
Betoni-, tiilimurske ja luonnonkiviaines	-	> 90 %
Tiilimurske	< 5 %	-
Asfalttimurske	< 5 %	< 5 %
Muu materiaali (ei ki- viainesperäinen)	< 1 %	< 2,5 %
Eristemateriaalit	< 0,1 tilavuus-%	< 0,5 tilavuus-%
Orgaaninen aines	< 0,1 tilavuus-%	< 0,5 tilavuus-%
Tiheys (uunikuiva)	> 2000 kg/m ³	> 1500 kg/m ³
Tiheys (vedellä kyllästetty)	> 2100 kg/m ³	> 1800 kg/m ³
Vedenimeytyminen	< 10 %	< 20 %

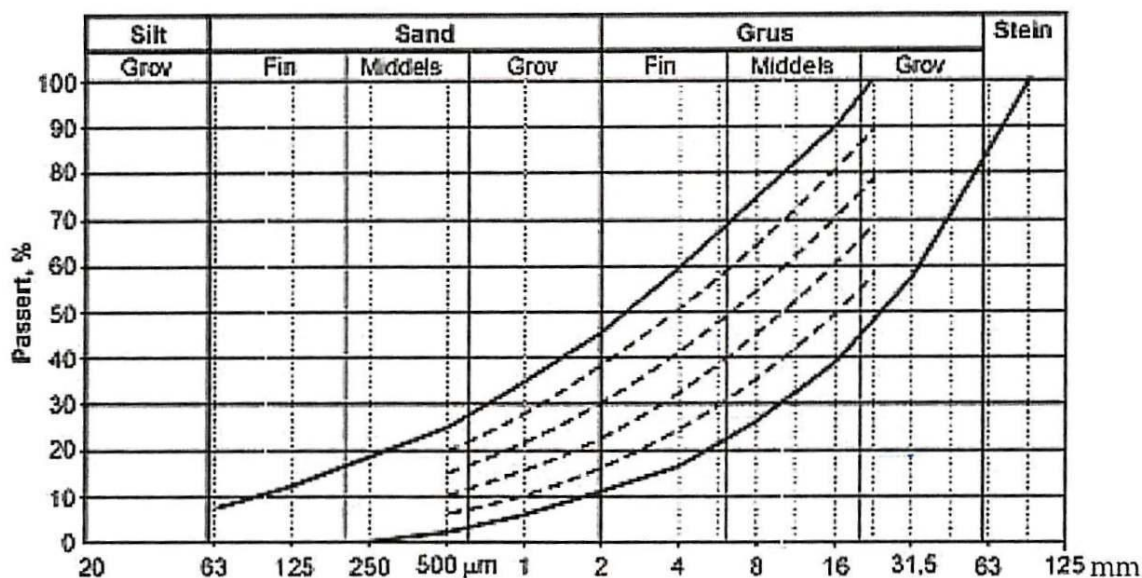
Taulukko 7.8. Norjalaisten betonimurskeluokkien soveltuvuus maarakentamiseen [Petkovic 2005].

	Jakava kerros (tie- ja katurakenteissa)	Kantava kerros (kevyenliikenteen väylä, parkkipaikka tai muu kevyesti kuormitettu alue)	Täytöt ja putkikaivannot
Materiaali	Gjb I	Gjb I ja Gjb II	Gjb II
Raekoko	0–120 mm	0–120 mm	10–20 mm, 20–38 mm

Puhtaan betonimurskeen Gjb I rakeisuusvaatimus kevyenliikenteen väylän, parkkipaikan tai muun kevyesti kuormitetun alueen kantavaan kerrokseen on esitetty kuvassa 7.6.

Muut materiaalivaatimukset kantavan kerroksen betonimurskeluokalle (Gjb I) on esitetty taulukossa 7.9. Litteysluku kuvaa rakeiden suuntautuneisuutta.

Eurooppatie E6 suunnittelussa käytetyt mitoitusparametrit [Aurstad et al. 2004] on esitetty taulukossa 7.2.



Kuva 7.6. Norjalaisen betonimurskeen Gjb I rakeisuusvaatimus päällysrakenteen kanta-vaan kerrokseen [Gjenbruksprosjektet 2005].

Taulukko 7.9. Norjan materiaalivaatimukset kantavan kerroksen betonimurskeelle Gjb I [Gjenbruksprosjektet 2005, Statens vegvesen 2005].

	Vaatimus	Toleranssi	Maksimi poikkeama
Los Angeles-luku	≤ 35	20 %	+ 5
Litteysluku (# > 8 mm)	≤ 30	20 %	+ 3
Läpäisy 0,063 mm (# < 20 mm osuudesta)	$\leq 8 \%$	20 %	+ 2 %

7.2.4 Tanskan käytäntö

Tanskassa betonimurskeluokkia on kolme: A, B ja C. Jaottelu tehdään puhtauden ja kestävyiden perusteella. A- ja B-luokkien betonimursketta voidaan käyttää kaikissa tietty-

peissä. C-luokan käyttö tierakenteissa on rajoitettua. Luokkajaon materiaali koostumuk-
sen mukaiset perusteet on esitetty taulukossa 7.10 ja kulutuskestävyysvaatimukset taulu-
kossa 7.11.

Betonimurskeluokille A, B ja C asetetut rakeisuusvaatimukset on esitetty taulukossa
7.12 ja kuvassa 7.7.

Tanskassa käytetyt betonimurskeen mitoitusparametrit [Pihl et al. 2003] on esitetty tau-
lukossa 7.2.

Taulukko 7.10. Betonimurskeluokkien materiaali pitoisuudet kun # > 4 mm tanskalais-
ten ohjeiden mukaisesti [Pihl et al. 2003].

Materiaali pitoisuudet [paino-%] Raekoko > 4 mm	Betonimurskeluokat		
	Luokka A	Luokka B	Luokka C
Betoni	≥ 98	≥ 95	≥ 80
Tiili	≤ 2,0	≤ 5,0	≤ 20
Asfaltti	≤ 2,0	≤ 2,0	≤ 2,0
Muu haitaton aines	≤ 2,0	≤ 5,0	≤ 20
Muu haitallinen aines *	≤ 0,5	≤ 1,0	≤ 2,0
Muu haitallinen aines **	≤ 0,02	≤ 0,02	≤ 0,02

* puu, paperi, pehmeät muovit, tuhka

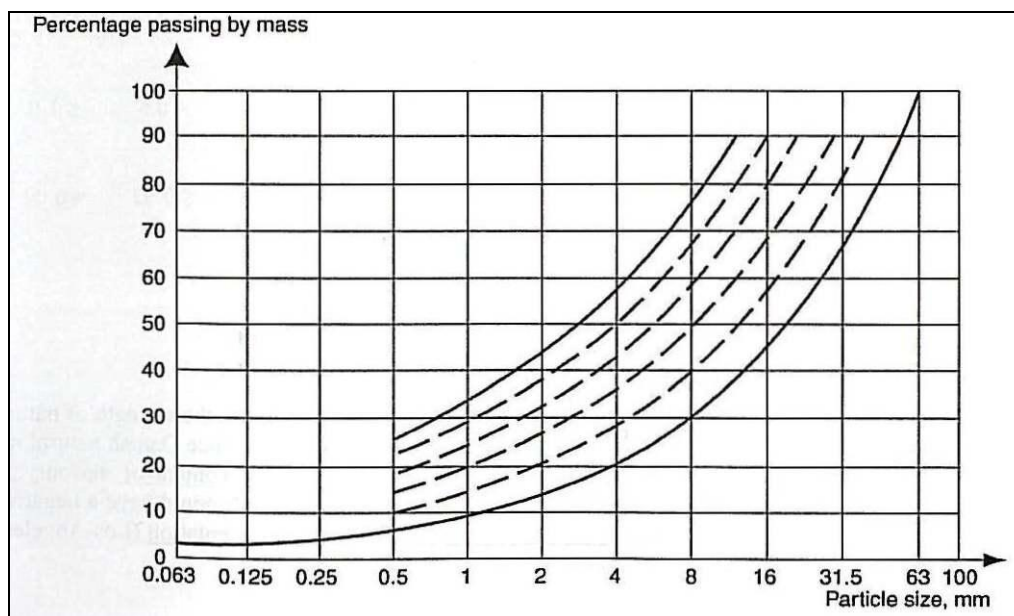
** kevyet eristemateriaalit: EPS, polyuretaani

Taulukko 7.11. Kulutuskestävyysvaatimukset betonimurskeluokille A, B ja C tanska-
laisten ohjeiden mukaisesti [Pihl et al. 2003].

	Luokka A	Luokka B	Luokka C
Kulutuskestävyys (Los Angeles-luku)	≤ 35	≤ 40	ei määritetty

Taulukko 7.12. Rakeisuuskäyrälle tanskalaisten ohjeiden mukaisesti asetetut rajoitteet kuvan 7.7 yhtäjaksoisesti piirrettyjen viivojen alueella [Pihl et al. 2003].

Betonimurskeluokka	Rakeisuuskäyrän kulku kuvassa 7.7	Läpäisy 0-0,0063
Luokka A	≤ 2 katkoviivan ylitys	$\leq 5 \%$
Luokka B	≤ 2 katkoviivan ylitys	$\leq 7 \%$
Luokka C	≤ 3 katkoviivan ylitys	$\leq 9 \%$



Kuva 7.7. Betonimurskeen rakeisuudelle asetetut rajakäyrät tanskalaisten ohjeiden mukaisesti [Pihl et al. 2003].

7.3 Uusien betonimursketuotteiden (BeM Hk, BeM Sr ja BeM Lo) parametrit

Lohja Rudus on tuomassa markkinoille kolme uutta betonimursketuotetta. Betoroc Hk, Betoroc Sr ja Betoroc Lo vastaavat rakeisuudeltaan nimilyhenteiden mukaisia luonnon kiviaineksia; hiekkaa, soraa ja louhetta. Kolmen uuden betonimursketuotteen pääasiallinen käyttökohde on täyttemateriaali tai routimattomana päällysrakenteen jakava kerros.

Uusien betonimursketuotteiden Betoroc Hk, Betoroc Sr ja Betoroc Lo materiaali koostumus on esitetty taulukossa 7.13.

Taulukoissa 7.14 ja 7.15 on esitetty betonimurskeluokkien Betoroc Hk, Betoroc Sr ja Betoroc Lo perusominaisuudet.

Taulukko 7.13. Betonimurskeluokkien BeM Hk, BeM Sr ja BeM Lo suurimmat sallitut muiden aineiden osuudet [Lohja Rudus Oy 2006a].

Betonimurskeluokka	Raaka-aine	Epäpuhtaudet [paino-%]	
		Tiili	Muu materiaali
Betoroc Hk	purkutyömaat	≤ 10	≤ 1
Betoroc Sr	purkutyömaat	≤ 30	≤ 1
Betoroc Lo	purkutyömaat	≤ 10	≤ 1

Taulukko 7.14. Betonimurskeluokkien Betoroc Hk, Betoroc Sr ja Betoroc Lo perusominaisuuksia [Lohja Rudus Oy 2006a].

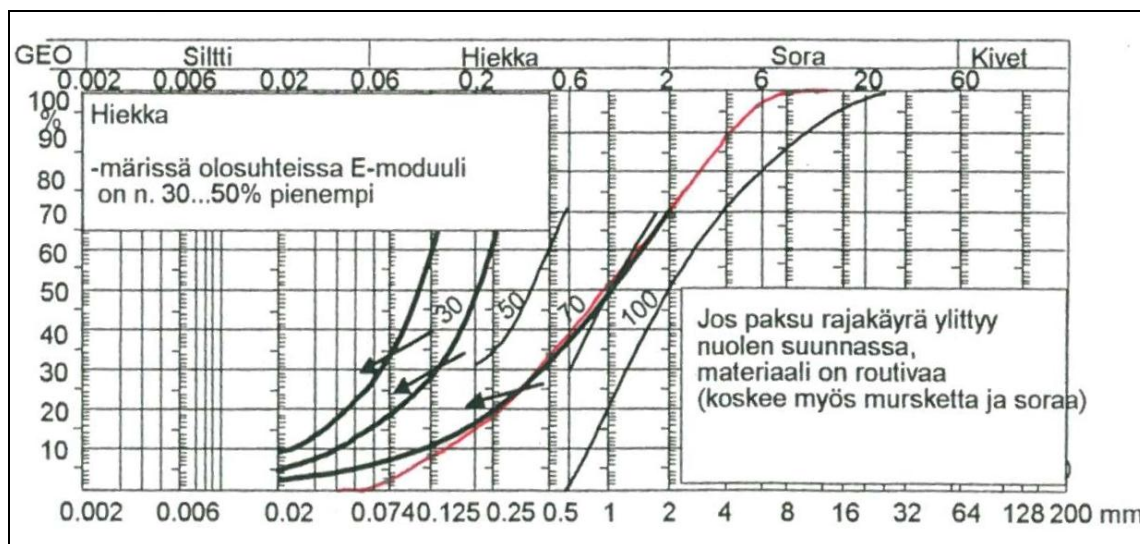
	Rakeisuus [mm]	Lujittuminen	Routivuus	Pääasiallinen käyttökohde
Betoroc Hk	0/8...0/12	epävarmaa	vaihtelee	täyte
Betoroc Sr	0/20... 0/65	epävarmaa	vaihtelee	jakava / pengertäyte
Betoroc Lo	0/90... 0/150	ei lujitu	routimaton	penger

Taulukko 7.15. Betonimurskeluokkien BeM Hk, BeM Sr ja BeM Lo perusominaisuuksia [Lohja Rudus Oy 2006a].

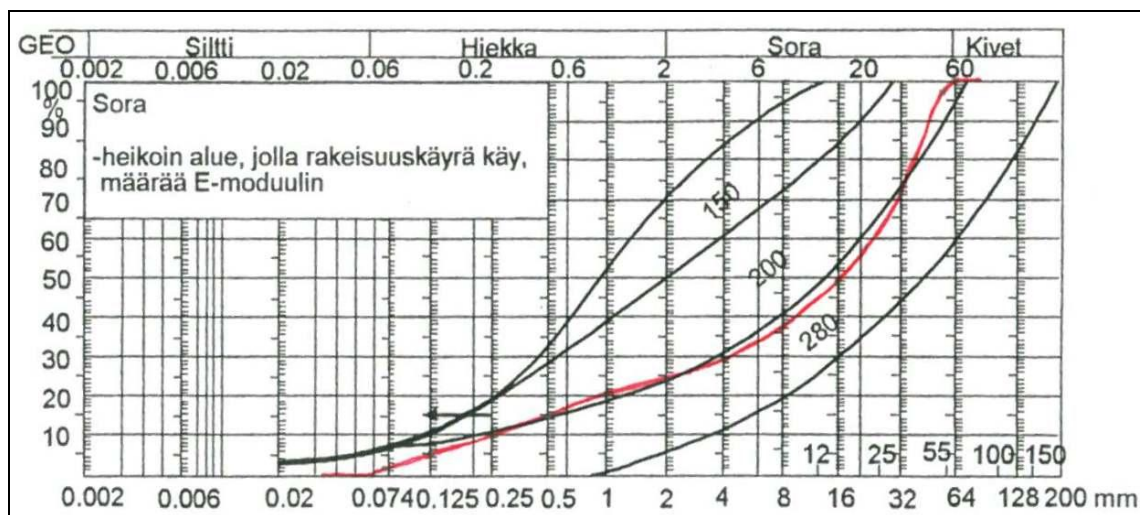
	Optimivesipitoisuus [%]	Maksimikuivatilavuuspaino [kN/m ³]	E-moduuli [MPa]
Betoroc Hk	vaihtelee	$18,0 \pm 1,5$	50...70
Betoroc Sr	vaihtelee	$19,0 \pm 1,5$	70...150
Betoroc Lo	9 ± 3	$19,0 \pm 1,5$	150...200

Kuvissa 7.8 ja 7.9 on esitetty betonimurskeluokkien Betoroc Hk ja Betoroc Sr rakeisuusesimerkit E-moduulin määrittämissä kaavioissa. Betoroc Hk:n E-moduuliksi voidaan kaa-

vion perusteella määrittää 70 MPa ja Betoroc Sr:n E-moduuliksi 200 MPa. Nämä määritykset ovat alustavia.



Kuva 7.8. Betonimurskeluokan Betoroc Hk rakeisuuskäyrä esimerkki punaisella E-moduulin määrittyskaavio [Lohja Rudus 2006c, Ehrola 1996].



Kuva 7.9. Betonimurskeluokan Betoroc Sr rakeisuuskäyrä esimerkki punaisella värillä E-moduulin määrittyskaavio. Betonimurske on murskattu jakavan kerroksen materiaaliksi. [Lohja Rudus 2006c, Ehrola 1996].

7.4 Muut kiviainespohjaiset jätteet

7.4.1 Betonikiviaines

Betonikiviaines syntyy tavallisimmin betoniautojen säiliön pesun yhteydessä. Betonikiviainesta syntyy noin 130 000 t vuosittain [Mäkelä & Höynälä 2000]. Säiliön sisään jäänyt ohut betonikerros on pestävä pois runsaalla vedellä ennen lujittumistaan. Betonipitoinen pesuvesi johdetaan lietealtaisiin ja kiintoaines laskeutetaan altaan pohjalle. Ylimääräinen vesi johdetaan pois tai kierrätetään takaisin pesuvedeksi. Betonikiviaines tunnetaan myös nimillä betoniliete ja pesuliete.

Betonikiviaines hyödyntäminen maarakentamisessa tehdään pääasiassa täyttötöissä [Ilama 2007]. Hienorakeiset betonikiviainekset soveltuvat pääsääntöisesti vain toisarvoisiin rakenteisiin, joissa ei edellytetä kantavuutta tai routimattomuutta. Karkearakeiset betonikiviainekset soveltuvat myös kohteisiin, joissa rakenteelta vaaditaan kantavuutta ja routakestävyyttä. [Tekes 2000]. Helsingin Konalan betoniaseman pesulietealtaat on esitetty kuvassa 7.10.

Betonikiviaineksen tekniset ominaisuudet on esitetty taulukossa 7.16 ja rakeisuus hienolle ja karkealle betonikiviainekselle kuvassa 7.11.

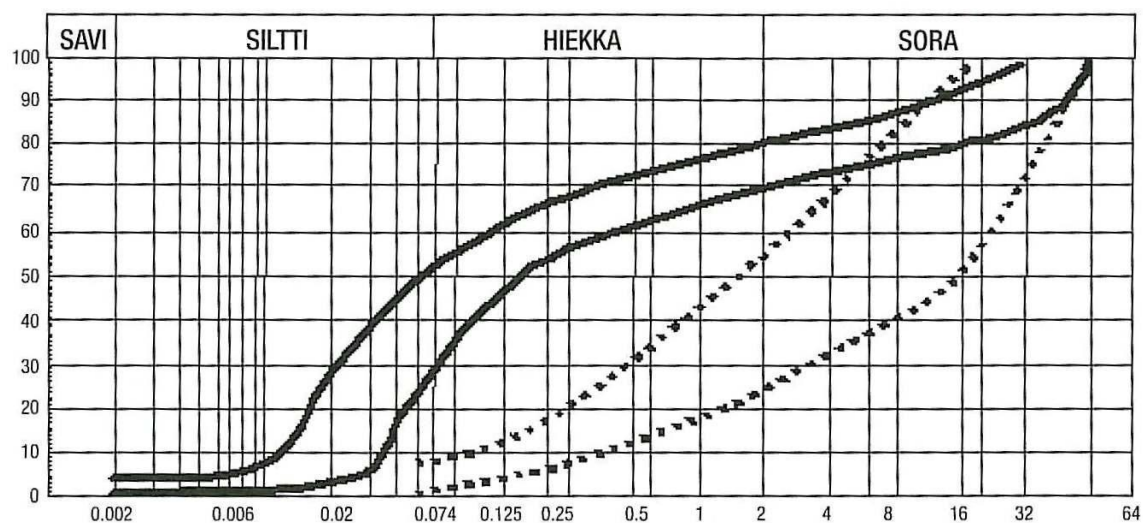


Kuva 7.10. Betonikiviaines johdetaan lietealtaisiin, jossa ylimääräinen vesi valutetaan pois.

Taulukko 7.16. Betonikiviaineksen tekniset ominaisuudet. Vaihteluvälin vasemmalla puolella arvot hienolle betonikiviainekselle ja oikealla karkealle. [Mäkelä & Höynälä 2000].

Ominaisuus	Arvo (hieno ... karkea liete)
Kiintotiheys	2,4 t/m ³
Maksimikuivatilavuuspaino	10,2...19,3 kN/m ³
Kapillaarisuus *	2...0,3 m
Vedenläpäisevyys *	10 ⁻⁵ ...10 ⁻² m/s
Optimivesipitoisuus	38...12 %
Vesipitoisuus	104...12 %
Kitkakulma	30...54 °
Koheesio	52...37 kPa
Puristuslujuus (1-aks.)	0,31...1,1 MPa
E-moduuli	
hienorakeinen	30...70 MPa
karkearakeinen	100...200 MPa

* rakeisuuden perusteella arvioitu



Kuva 7.11. Hieno- (—) ja karkearakeisen (----) betonikiviaineksen rakeisuusalue [Mäkelä & Höynälä 2000].

Pääsääntöisesti hienorakeiset betonikiviainekset soveltuvat toisarvoisiin rakenteisiin, joissa ei edellytetä kantavuutta tai routimattomuutta. Karkearakeiset betonikiviainekset soveltuvat myös kantavuutta ja routakestävyyttä edellyttäviin kohteisiin, mikäli materiaali täyttää muut rakenteelle esitetyt vaatimukset [Mäkelä & Höynälä 2000].

7.4.2 Tiilimurske

Rakennusten purkujätteestä lajiteltua tiilijätettä syntyy vuosittain noin 20 000 t [Mäkelä & Höynälä 2000]. Tiilijäte murskataan ja seulotaan haluttuun fraktioon (kuva 7.12). Mahdolliset epäpuhtaudet kuten eristemateriaali erotetaan tiilimurskeesta.

Alankomaissa tiilimursketta on käytetty tierakenteissa yli 25 vuoden ajan. Pohjoismaissa ja Suomessa on vähän kokemusta tiilimurskeella rakentamisesta. Tiilimursketta on käytetty alhaisen kantavuusvaatimuksen päällysrakennekerroksessa, kuten kevyenliikenteen väylän jakavassa kerroksessa ja suodatinkerroksessa. Pelkkä tiilimurske on todettu lujuudeltaan heikoksi materiaaliksi käytettäväksi ajoneuvoväylän jakavaan kerrokseen. Tiilimurskeen ominaisuuksia voidaan parantaa sekoittamalla siihen esimerkiksi betonimursketta tai soraa. Kaatopaikkarakentamisessa tiilimurske soveltuu pintarakenteen kasvukerrokseen ja pintamaaksi sekä mahdollisesti myös kuivatus- ja kaasunkeräyskerrokseen. [Juvonen 2006, Mäkelä & Höynälä 2000].

Tiilimurskeen tekniset ominaisuudet on esitetty taulukossa 7.17.



Kuva 7.12. Purkutyömaan tiilijäte murskataan ja seulotaan haluttuun fraktioon. Tiilijätteestä erotellaan haitallinen aines kuten eristemateriaalit. Kuvat Helsingin Konalan lajittelukeskukselta 21.9.2006. [Kuvat: Juha Forsman / Ramboll Finland Oy].

Taulukko 7.17. Tiilimurskeen teknisiä ominaisuuksia [Mäkelä & Höynälä 2000].

Ominaisuus	Arvo
Rakeisuus	0...50 mm
Maksimikuivatilavuuspaino	17...18 kN/m ³
Lämmönjohtavuus (sula/jäätynyt)	
kosteana (w=10 paino-%)	0,7...0,8 / 0,85...0,95 W/mK
märkänä (w=15 paino-%)	1,15...1,25 / 1,15...1,35 W/mK
E-moduuli	70...100 MPa

7.4.3 Betonimurskesekoitukset

Betonimurskesekoituksilla tarkoitetaan materiaalisekoituksia, jotka koostuvat esim. seuraavien aineiden yhdistelmästä:

- betonimurske,
- betonikiviaines,
- tiilimurske.

Sekoittamalla edellä lueteltuja materiaaleja on mahdollista parantaa alkuperäisten materiaalien ominaisuuksia. Esimerkiksi tiilimurske on sellaisenaan huokoinen ja melko hauras materiaali, mutta sekoitettuna betonikiviainekseen sen ominaisuudet paranevat. Tii-

limurske saa tukea kiinteämmältä materiaalilta ja samalla kuiva tiili imee itseensä ylimääräistä kosteutta betonikiviaineksesta lähestyen paremmin tiivistyvää vesipitoisuutta. Betonikiviaineksen ja purkukohteen tiilimurskeen sekoitusta voidaan käyttää tavanomaisen maarakentamisen lisäksi myös kasvualustana [Räty 2006].

8. Yhteenveto

Valtioneuvoston asetus eräiden jätteiden hyödyntämisestä maarakentamisessa on astunut voimaan kesällä 2006. Asetuksen [VNa 591/2006] odotetaan lisäävän pohjatuhkan, lentotuhkan ja betonimurskeen hyödyntämistä maarakentamisessa ympäristöluvasta yksinkertaisemman ilmoitusmenettelyn ja selkeiden lainsäädännöllisten ohjeiden takia. VNa 591/2006 asettaa ehdot hyödynnettävälle materiaalille, asetuksen sovellusaloille sekä vaatimukset rakenteelle.

VNa 591/2006 soveltamisaloja ovat:

- yleiset tiet ja kadut sekä niihin välittömästi liittyvät alueet (pois lukien meluesteet),
- pysäköintialueet, urheilukentät ja kevyenliikenteen reitit,
- teollisuuden varastointikentät ja tiet.

Soveltamisalojen rajoittamisella varmistetaan pohjatuhkan, lentotuhkan ja betonimurskeen hyödyntäminen tarkoituksen mukaisessa maarakentamisessa, eikä todellisuudessa loppusijoittamiseksi tarkoitettussa toiminnassa. Muita asetuksen vaatimuksia ovat:

- jätteiden haitallisten aineiden pitoisuus ja liukoisuus ei saa ylittää esitettyjä raja-arvoja,
- rakenteen paksuus on enimmillään 1,50 m,
- rakenne on peitettävä (paksuus ≥ 10 cm) tai päällystettävä (asfaltin tyhjätila ≤ 5 %),
- hyödyntämistä ei sallita I- ja II-luokan pohjavesialueilla, eikä vesistön välittömässä läheisyydessä,
- hyödyntämisestä on tehtävä ilmoitus alueelliselle ympäristöviranomaiselle.

Pohjatuhkaa käytetään maarakennushankkeissa kuten saman rakeisuuden ja vastaavat toiminnalliset ominaisuudet omaavaa luonnon kiviainesta. Pohjatuhka on melko ongelmaton materiaali rakennusteknisiltä ominaisuuksiltaan, mutta vaatii kuitenkin huolellisen tiivistämisen ja käyttökohteen, johon se soveltuu geoteknisten ominaisuuksien perusteella. Pohjatuhkan parametrivertailu on esitetty taulukossa 6.1 ja pohjatuhkaohjeet liitteessä 1.

Koerakentamisella saatiin myönteistä tietoa pohjatuhkalla rakentamisesta ja sen geoteknisistä ominaisuuksista. Pohjatuhkan (hiilipölytuhka) kivettömyys helpottaa rakentamista ja säästää työkoneita. Pohjatuhkan kantavuus on osoittautunut olevan riittävä alhaisen kantavuusvaatimusten rakenteisiin ja käyttökelpoinen esimerkiksi päällysrakenteen suodatinkerroksessa. Laboratoriokokeiden ja Hyvinkään kenttäkokeiden perusteella pohjatuhka voidaan tiivistää suhteellisen laajalla vesipitoisuusalueella. Pohjatuhka on usein kosteaa työmaalle tuotaessa, mutta liettyminen ei ollut ongelma Viikin eikä Hyvinkään koerakennuskohteessa.

Lentotuhka on hienojakoinen materiaali, jota voidaan käyttää maarakentamisessa kuten luonnon kiviaineksia. Lentotuhka on lujittuva materiaali, jonka lujittumisominaisuudet vaihtelevat varastointitavan mukaan. Siilossa varastoitu kuiva lentotuhka lujittuu ja aumavarastoidun lentotuhkan lujittumiskyky vaihtelee riippuen varastointiajasta ja olosuhteista. Lentotuhka soveltuu rakennusmateriaaliksi kohteisiin, jotka rakennetaan ja suunnitellaan huolella. Lentotuhkaa pidetään yleisesti vaativana rakennusmateriaalina. Lentotuhkarakenne vaatii huolellisen ja tasaisen tiivistämisen myös kohteen reuna-alueilla. Lentotuhka on suojattava sateelta rakentamisen aikana ja pölyäminen on estettävä kaikissa rakentamisen työvaiheissa. Lentotuhkan parametrivertailu on esitetty taulukossa 6.2 ja lentotuhkaohjeet liitteessä 2.

Betonimurskerakentamisella on jo pitkät perinteet Suomessa. Betonimurske on geoteknisiltä ominaisuuksiltaan verrattavissa kalliomurskeeseen. Betonimurske on murskauksen jälkeen uudelleen lujittuva materiaali. Lujittuminen vaatii kuitenkin huolellisen tiivistämistyön optimivesipitoisuudessa, riittävän jälkihoidon ja lujittuvan materiaalivalinnan. Lujittuvia lajikkeita ovat BeM I ja BeM II. Betonimurskeiden BeM III ja BeM IV lujittuminen vaihtelee. Betonimurske murskataan haluttuun fraktioon siten, että betonimurske on sovelias esimerkiksi päällysrakenteen kantavaan, jakavaan kerrokseen tai muuhun sovellukseen. Betonimurskeelle on laadittu käyttöohjeet myös Ruotsissa, Norjassa ja Tanskassa. Ohjeet jaottelevat betonimurskeet laatuluokkiin, kuten Suomessa. Laatuluokkien perustana on useimmiten puhtausaste ja raaka-aineen alkuperä. Laatuluokille on annettu myös materiaalin kantavuutta kuvaava E-moduuli. Betonimurskeen

parametrivertailu on esitetty taulukossa 7.2. Lohja Ruduksen Betoroc-murskeen ohjeet on esitetty liitteessä 3.

Uusiomateriaalien, kuten pohjatuhkan, lentotuhkan ja betonimurskeen hyötykäytön etuja ovat uusiutumattomien luonnonvarojen ja kaatopaikkatilan säästäminen sekä yleensä lyhyemmät kuljetusmatkat.

9. Kirjallisuusluettelo

Airiola, S. 1996. Teollisuuden sivutuotteiden geotekninen hyödyntäminen Euroopassa ja erityisesti muissa Pohjoismaissa. Oulun Yliopiston Geotekniikan laboratorion julkaisuja 25. 34 s.

Arm, M. & Ydrevik, K. 2001. Crushed Concrete in Roads – Experience from Sweden. Nordic Road & Transport Research. Lehtiartikkeli 3/2001. 4 s.

Arm, M. 2003. Mechanical Properties of Residues as Unbound Road Materials - experimental tests on MSWI bottom ash, crushed concrete and blast furnace slag. Doctoral Thesis- Kungliga Tekniska Högskolan, Land and Water Resources Engineering. Stockholm. TRITA-LWR PhD 1007. 123 s.

Aurstad, J., Aksnes, J., Dahlhaug, J. E., Bernstren, G. & Uthus, N. 2004. Unbound crushed concrete in high volume roads – A field and laboratory study. Verkkodokumentti luettu 11.1.2007. 12s.

<http://www.sintef.no/upload/126.pdf>

Beuving, E., François, D., Krass, K. 2005. Methodology for assessing alternative materials for road construction. Samaris – Sustainable and Advanced Materials for Road Infrastructure. Deliverable 16. s. 143.

Eduskunta. 2006. Verkkodokumentti. Luettu 10.1.2007
http://www.eduskunta.fi/faktatmp/utatmp/akxtmp/kk_424_2006_p.shtml

Ehrola, E. 1996. Liikenneväylien rakennesuunnittelun perusteet. Rakennustieto Oy. 365 s.

Finergy. 2000. Tuhkarakentamisohje. Energia-alan keskusliitto ry Finergy. 98 s.

Finnlund, M. 2004. Uudenmaan alueellinen jätesuunnitelma. Uudenmaan ympäristökeskus. Helsinki. 55 s.

Gardemeister, R. 1966. Geoteknilliset laboratoriotutkimukset. Valtion teknillinen tutkimuslaitos. Geoteknillinen laboratorio. 134 s.

Gjenbruksprosjektet. 2005. Gjenbruk av knust betong i vegbygging, Mekaniske egenskaper og testmetoder. Teknologirapport nr. 2422. Statens vegvesen, Vegdirektoratet. Teknologivdelingen. 47 s.
<http://www.gjenbruksprosjektet.net/filemanager/download/1631/Prosjektrapport%20nr%2011.pdf/>

Havukainen, J. 2007. Suullinen tiedonanto. 29.1.2007. Ramboll Finland Oy.

Havukainen, J., Hämäläinen, A. & Latvala, A. 1987. Kivihiilituhkien käyttökokemukset kunnallistekniikan maarakenteissa. Tuhkaprojektin loppuraportti. Helsingin kaupungin kiinteistövirasto. Geotekninen osasto. s. 84.

Helsingin Energia, Viatek Oy. 2001. Pohjatuhka 2001. 17 s.

Helsingin Energia. 2006. Verkkodokumentti. Luettu 19.12.2006.
<http://www.helsinginenergia.fi/ymparisto/sivutuotteet.html>

Helsingin Energia. 2007. Energiantuotannon ja -siirron muut ympäristövaikutukset. Kiinteät jätteet -verkkodokumentti. Luettu 19.1.2007.
<http://www.energia.fi/page.asp?Section=4540>

Helsingin kaupungin kiinteistövirasto. 1983. Kivihiilituhkan käyttö maarakentamisessa, Tekniset ohjeet. Tiedote 31. 15.2.1983. 36 s.

Helsingin kaupunki. 2001. Helsingin kaupungin tuhkarakentamisohje. Loppuraportti. 88 s.

Ilama, P. 2007. Suullinen tiedonanto 23.2.2007. Lohja Rudus Oy.

InfraRYL 2006. 2006. Infrarakentamisen yleiset laatuvaatimukset, Osa 1 Väylät ja alueet. RT 14–10878. 624 s.

InfraRYL 2006. 2007. Infrarakentamisen yleiset laatuvaatimukset. Osa 2, Päälys- ja pintarakenteet.

Juvankoski, M & Kivikoski, H. 2001. Kohderaportti: Mt 272 Ämttö, Kivihiilituhkan käyttö tierakenteissa ”Porin tuhkatie”. Tien pohja- ja päällysrakenteet-tutkimusohjelma. Tiehallinto. s. 79.

Juvonen, J. 2006. Betoni- ja tiilimurskeen kierrättäminen ja hyödyntäminen maarakentamisessa. Hämeen ammattikorkeakoulu. Opinnäytetyö. 83 s.

Kiertokapula Oy. 2007. Verkkosivusto. Luettu 12.2.2007.

<http://www.kiertokapula.fi/>

Lahtinen, P., Kolisoja, P., Kuula-Väisänen, P., Leppänen, M., Jyrävä, H., Maijala, A. & Ronkainen, M. 2005. UUMA-esiselvitys. Ympäristöministeriö. Suomen ympäristö 805. 121 s.

<http://www.ymparisto.fi/julkaisut>

Lahtinen, P. 2001. Fly Ash Mixtures as Flexible Structural Materials for Low-Volume Roads. Finnra Reports 70/2001. Tiehallinto. 148 s.

Lindholm, M. 1997. Kivihiilituhkan hyötykäyttö tienrakentamisessa. Teknillinen korkeakoulu. Rakennus- ja yhdyskuntatekniikan osasto. Diplomityö. 70 s.

Lohja Rudus. 2006a. Betonimurskeen laadunhallintajärjestelmä. 18.8.2006. 29 s.

Lohja Rudus. 2006b. Pohjatuhkan puristuslujuudet. ICT-laitteen laboratorioetulokset 22.5.–24.8.2006. Salvor.

Lohja Rudus. 2006c. Rakeisuusmääritykset. Laatuselosteet 9.9.2006 ja 25.9.2006.

Lohja Rudus. 2007. Betonin kierrätys. Verkkosivusto. Luettu 8.2.2007.
<http://www.lohjarudus.fi/kierratys/default.asp?cat=5&va=16>

Maijala, A. 1996. Voimalaitostuhkien ja rikinpoistotuotteen jalostaminen hyötykäyttöön maarakentamisessa. Kansainvälisen tiedon kartoitus. Kooste sovelluksista ja kokemuksista muualla kuin Suomessa. Viatek Oy / Suomen Geotutkimus SGT

Mroueh, U., Wahlström, M., Laine-Ylijoki, J. & Mäkelä, E. 2006. Tausta-aineistoa ”Valtioneuvoston asetuksen eräiden jätteiden hyödyntämisestä maarakentamisessa” valmistelua varten. 31 s.

Muilu, M & Jokinen, T. 2006. Kirjallinen tiedonanto. Sähköpostit 28.11.–22.12.2006. Fortum Power and Heat Oy.

Mäkelä, H & Höynälä, H. 2000. Sivutuotteet ja uusiomateriaalit maarakenteissa. Materiaalit ja käyttökohteet. Teknologia katsaus 91/2000. Tekes. 97 s.

Mäkelä, E., Wahlström, M., Mroueh, U., Keppo, M. & Rämö, P. 1995. Kivihiilivoimaloiden rikinpoistotuotteiden ja lentotuhkan hyötykäyttö maarakentamisessa. Valtion teknillinen tutkimuskeskus, VTT julkaisuja. 86 s.
<http://virtual.vtt.fi/inf/pdf/julkaisut/1995/J809.pdf>

Määttänen, A. 2000. Betonin kierrätys ja betonimurskeen käyttö maarakentamisessa. Tampereen teknillinen korkeakoulu, Rakennustekniikan osasto. Diplomityö. 124 s.

Määttänen, A. 2007. Kirjallinen tiedonanto. Sähköposti 12.1.2007.

NR&TR. 2001. Crushed Concrete in Roads – Experience from Sweden. Swedish National Road and Transport Research Institute. Article No 3 2001.
<http://www.vti.se/Nordic/3-01mapp/svart1.htm>

Petkovic, G. 2005. Recycled Aggregates Project of the Norwegian Road Authorities. UEPG Recycling Symposium 2005. Statens vegvesen. 25 s.

Pfister, K. 2006. Ehdotus Valtioneuvoston asetukseksi eräiden jätteiden hyödyntämisestä maarakentamisessa. Muistio 12.6.2006. Ympäristöministeriö. 14 s.

Pihl, K., Milvang-Jensen, O. & Berg, F. 2003. Crushed concrete from building demolition – a high quality material for road construction. Danish Road Institute. Report 129. Verkkodokumentti luettu 11.1.2007. 18 s.
<http://www.vejdirektoratet.dk/pdf/129vi.pdf>

Rakennustuoteteollisuus RTT ry. 2005. Betoni – käyttöohje. Työmaan aloituskokouksen valmisbetonin toimitussuunnitelma. 47 s.
<http://www.kivitalo.fi/docs/betonityomaaohje.doc>

Ramboll Finland Oy. 2007. Vuosaaren vaihtoehtoiset päällysrakenteet. Päällysrakenne-
koe II. Helmikuu 2007. 72 s.

Rantamäki, M. & Tammirinne, M. 2002. Pohjarakennus. Otakustantamo 465. 232 s.

Rantamäki, M., Jääskeläinen, R. & Tammirinne, M. 1992. Geotekniikka. Otatieto 464. 307 s.

RIL 132–2000. 2000. Talonrakennuksen maarakenteet – yleinen rakennusselostus ja laatuvaatimukset. Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL r.y.. s.123.

Räty, H. 2006. Infra-teknologiaohjelma 2001-2005. Verkkodokumentti 13.2.2006. Tekes. 24 s.

http://www.asuntotieto.com/INFRA2010/Aineisto/Raty_130206.pdf

SCC Viatek Oy. 2001a. Paikallistie PT 11636, tuhkakoerakenteet. Tuhkakoerakenteiden kevään 2001 vaurioiden analysointi. Tiehallinto, Uudenmaan tiepiiri. 30 s.

SCC Viatek Oy. 2001b. Kantavuusmittaukset ja koekuoppatutkimukset kohteissa: Sor-savuorenraitti, Karpalotie ja Hanasaaren voimalaitoksen ajorata. Helsingin Energia, Rakennusvirasto, Ympäristöministeriö. 26 s.

SCC Viatek Oy. 2001c. Betonimurskeen aukikaivaminen. Raportti 9.11.2001. Lohja Rudus Oy. 16 s.

SCC Viatek Oy. 2002. Uusiomateriaalit yhdyskuntien liikenneväylien pehmeikköra-kentamisessa. Loppuraportti. Ekoinfra-projekti 2000...2002. 51 s.

SCC Viatek Oy. 2004. Leca-soran materiaalimoduulit, täydentävät analysoinnit 2003. Tutkimusraportti. Optiroc. 23 s.

SGY. 1985. Geotekniset laboratorio-ohjeet, 1. Luokituskokeet. Espoo, Suomen geotek-nillinen yhdistys ry, Rakentajain Kustantamo Oy. 107 s.

SGY. 2007. Uusiomaarakenteiden tietokanta.

<http://www.mcit.se/sgy/>

Statens vegvesen. 2005. Håndbok 018. Normaler - Vegbygging. 416 s.

http://www.vegvesen.no/vegnormaler/hb/018/hb_018_web.pdf

Suomen Kuntaliitto. 2002. Kunnallistöiden yleinen työselitys 02. 297 s.

Suomen Kuntaliitto. 2000. Betonimurske kadun päällysrakenteessa 2000. Suunnitteluoh-je, Työselostus. 28 s.

TFHRC. 2002. Coal bottom ash/boiler slag material description. U.S. Department of Transportation. Federal Highway Administration. Verkkodokumentti luettu 18.1.2007. 7 s.

<http://www.tfhrc.gov/hnr20/recycle/waste/cbabs1.htm>

Tiehallinto. 2004. Tierakenteen suunnittelu. Suunnitteluvaiheen ohjaus. TieH 2100029-04. 69 s.

Tielaitos. 1994. Rakentamisen laadunvarmistus. Alusrakenne ja päällysrakenteen sitomattomat kerrokset. Geokeskus. 165 s.

Tielaitos. 1999. Murskaustyöt. Tienrakennustöiden yleiset laatuvaatimukset ja työselitykset. Tiehallinto. Tie- ja liikennetekniikka. 31 s.

Tielaitos. 2000. Betonimurskeen käyttö tien päällysrakennekerroksissa. Mitoitus- ja työohjeet. Tielaitoksen selvityksiä 5/2000. Tiehallinto, Tie- ja Liikennetekniikka. 28 s.

Tilastokeskus. 2006. Tieto & Trendi 10/2006. Aikakausilehti.

Uudenmaan ympäristökeskus. 2007. Pohjavesialueet-verkkosivusto. Luettu 9.2.2007. <http://www.ymparisto.fi/default.asp?node=14745&lan=fi>

Viatek Oy. 1999. Betonimurskeen mitoitusparametrit. Betonimurskeen ohjeistamisprojekti 1998–1999. Lohja Rudus Ympäristöteknologia. 56 s.

Viatek Oy. 2000. Tuhkan maarakentamisohje (TMO-00). Espoon kaupunki. 50 s.

Vipulanandan, C. & Basheer, M. 1998. Recycled Materials for Embankment Construction. Geo Congress 1998. ASCE. 15 s.

VNa 591/2006. 2006. Valtioneuvoston asetus eräiden jätteiden hyödyntämisestä maarakentamisessa. Ympäristöministeriö. 8 s.

Vägverket. 2004. Krossad betong i vägkonstruktioner. ISSN 1401-9612. 23 s.

http://www.vv.se/filer/publikationer/ATB_Krossad_betong_2004-11.pdf

Ympäristöministeriö. 2005. Betonirakenteet B4. Suomen rakentamismääräyskokoelma.

Ympäristöministeriön asetus betonirakenteista. Luettu 22.2.2007. 83 s.

<http://www.ymparisto.fi/download.asp?contentid=17790>

Liitteet

Liite 1	Pohjatuhkaohje
Liite 2	Lentotuhkaohje
Liite 3	Betoroc-ohje
Liite 4	Lohja Ruduksen betonimurskereferenssit
Liite 5	Valtioneuvoston asetus eräiden jätteiden hyödyntämisestä maarakentamisessa, VNa 591/2006
Liite 6	Ilmoitus jätteen hyödyntämisestä maarakentamisessa
Liite 7	Viikin pohjatuhkakoerakenteet, koekentän 1 kerrospaksuudet
Liite 8	Viikin pohjatuhkakoerakenteet, koekentän 2 kerrospaksuudet
Liite 9	Viikin pohjatuhkakoerakenteet, tilavuuspainot
Liite 10	Viikin pohjatuhkakoerakenteet, pudotuspainokokeiden tulokset
Liite 11	Hyvinkään pohjatuhkakoerakenteet, kantavuusmittaukset
Liite 12	Hyvinkään pohjatuhkakoerakenteet, E-moduulin takaisinlaskenta
Liite 13	Laboratoriotutkimukset, Rowen ödometrin jännitys-muodonmuutos kuvaajat
Liite 14	Pohjatuhkan puristuslujuudet

Lohja Rudus Oy Ab

Pohjatuhkaohje

Käyttöohje rakentamiseen ja suunnitteluun

15.2.2007

Viite	82113199
Versio	Koekäyttöön
Pvm	15.2.2007
Hyväksynyt	Antti Määttänen
Tarkistanut	Jorma Havukainen, Juha Forsman, Antti Määttänen, Petri Ilama, Tuomo Joutsenoja
Kirjoittanut	Miikka Hakari

1. Johdanto

Pohjatuhka on energiantuotannon sivutuotteena syntyvä mineraalinen materiaali, jota voidaan käyttää maarakentamisessa. Pohjatuhkaa käyttämällä korvataan luonnon maa- ja kiviaineita. Lohja Ruduksen toimittaman kivihiilivoimalaitoksen pohjatuhkan ominaisuudet ja laatu vastaavat ”Valtioneuvoston asetus eräiden jätteiden hyödyntämisestä maarakentamisessa” [VNa 591/2006] vaatimuksia.

Pohjatuhka soveltuu tämän ohjeen mukaisesti käytettynä samoihin kohteisiin kuin vastaavat toiminnalliset ominaisuudet omaava luonnon maa- ja kiviaines. Pääasialliset käyttökohteet ovat katujen ja kevyenliikenteenväylien suodatinkerroksessa, pengertäytössä, kenttärakenteissa ja muissa täytöissä.

Tämä ohje on Lohja Ruduksen käyttöohje pohjatuhkan hyödyntämisestä maarakentamisessa VNa:n vaatimusten mukaisesti. Muita pohjatuhkaohjeita ovat mm. ”Pohjatuhka 2001” [Helsingin Energia, Viatek Oy 2001], ”Helsingin kaupungin tuhkarakentamisohje” [Helsingin kaupunki 2001], ”Tuhkan maarakentamisohje” [Espoon kaupunki, Espoon Sähkö Oy 2000], ”Tuhkarakentamisohje tie-, katu- ja kenttärakenteisiin” [Finergy 2000] ja Tuhkaprojektin loppuraportti [Helsingin kaupungin kiinteistövirasto 1987].

Lohja Ruduksen toimittamaa pohjatuhkaa käytettäessä on tämä ohje ensisijainen.

Yleisiä maarakentamisen ohjeita ovat mm. ”Infrarakentamisen yleiset laatuvaatimukset” [InfraRYL 2006] ja ”Talonrakennuksen maarakenteet – yleinen rakennusselostus ja laatuvaatimukset” [RIL 132–2000].

2. Pohjatuhkat

2.1 Pohjatuhkan synty

Pohjatuhka syntyy kivihiilen palamistuotteena ja se kerätään talteen polttokattilan pohjalta. Suurin osa on hiilipölykattilan pohjatuhkaa.

Pohjatuhkat voidaan jakaa kivihiilivoimalaitoksen hiilipölykattilan pohjatuhkiin ja leijupetikattilan pohjatuhkiin. Tässä ohjeessa on käsitelty hiilipölykattilan pohjatuhkaa. Karkearakeisemman, leijupetikattilan pohjatuhkan ominaisuuksista ja saatavuudesta antavat tietoja Lohja Ruduksen yhteyshenkilöt.

2.2 Tekniset ominaisuudet ja laatuvaatimukset

Pohjatuhkan geotekniset perusominaisuudet on esitetty taulukossa 1.

Taulukko 1. Pohjatuhkan geotekniset perusominaisuudet (hiilipölykattila).

Ominaisuus	Pohjatuhka
Pääasiallinen käyttökohde	suodatinkerros / täytemateriaali
Rakeisuus	0,002–16 mm (raekokovastaavuus hiekka)
Lujittuminen	ei lujitu / lujittuu heikosti
Routivuus	routimaton
Optimivesipitoisuus *	20 ± 4 % (tiivistettävissä laajemmalla alueella)
Maksimikuivatilavuuspaino	12,5 ± 2,5 kN/m ³
Puristuslujuus 1-aks. (28 d)	0–0,3 MPa
E-moduuli	50–100 MPa
Kitkakulma	39-53°
Koheesio	10–30 kPa
Vedenläpäisevyys	10 ⁻⁵ –10 ⁻⁶ m/s
Lämmönjohtavuus	0,9 W/mK

* eräkohtainen optimivesipitoisuus toimitetaan pyydettyäessä

2.3 Ympäristökelpoisuus ja laatuvaatimukset

Lohja Ruduksen toimittama pohjatuhka täyttää Valtioneuvoston asetuksen [VNa 591/2006] vaatimukset.

VNa:n määrittelemät, pohjatuhkan laadunvalvontatutkimusten haitallisten aineiden pitoisuuden ja liukoisuuden raja-arvot on esitetty taulukossa 2.

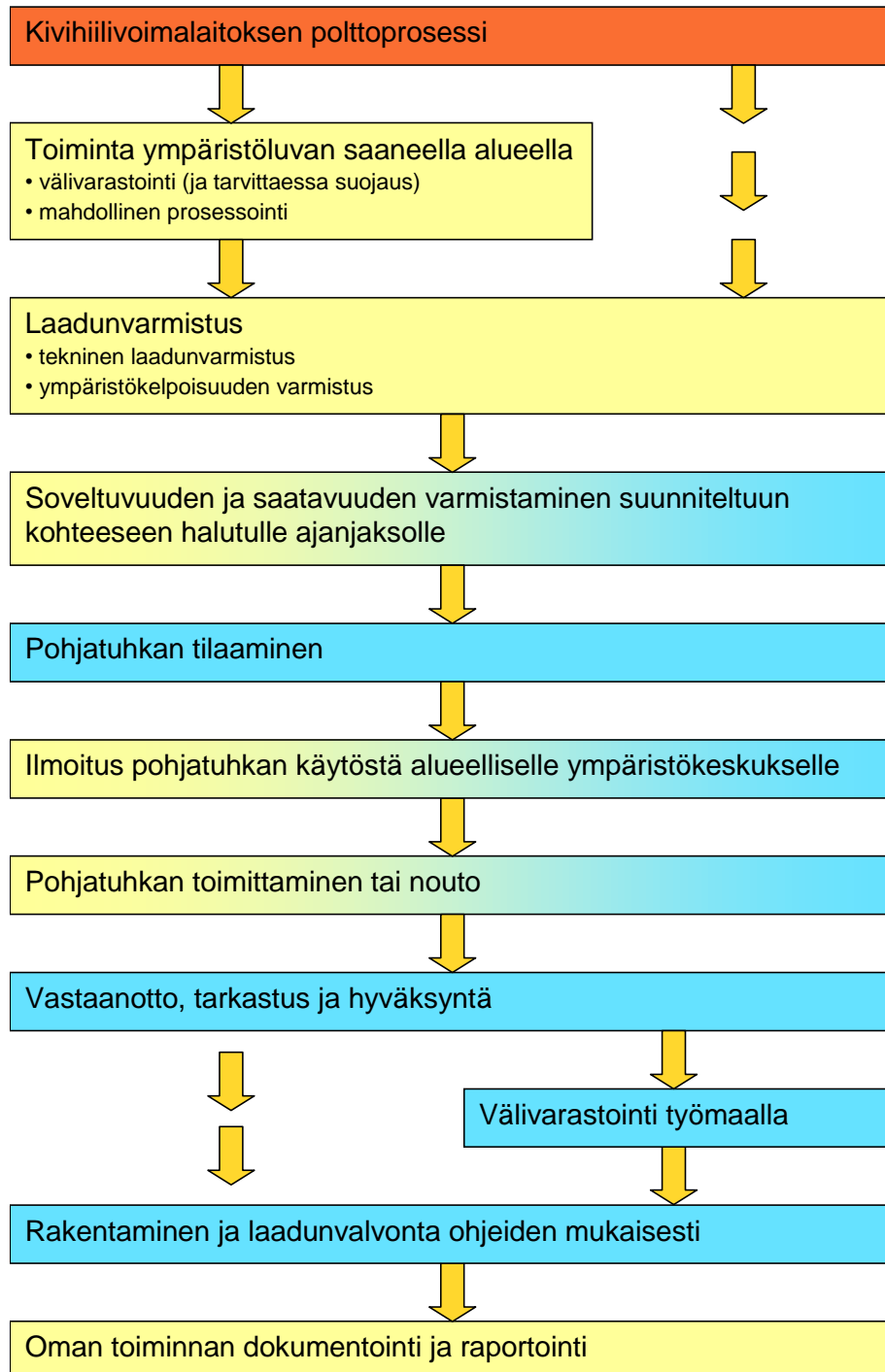
Taulukko 2. Pohjatuhkan haitallisten aineiden pitoisuuden ja liukoisuuden raja-arvot laadunvalvontatutkimuksissa [VNa 591/2006].

Haitallinen aine	Raja-arvo, mg/kg kuiva-ainetta		
	Laadunvalvontatutkimukset		
	Pitoisuus *	Liukoisuus * (L/S = 10 l/kg) Peitetty rakenne	Liukoisuus * (L/S = 10 l/kg) Päällystetty rakenne
Arseeni (As)	50		
Barium (Ba)	3 000		
Kadmium (Cd)	15		
Kromi (Cr)	400	0,5	3,0
Kupari (Cu)	400		
Lyijy (Pb)	300	0,5	1,5
Molybdeeni (Mo)	50	0,5	6,0
Vanadiini (V)	400	2,0	3,0
Sinkki (Zn)	2 000		
Seleeni (Se)		0,1	0,5
Fluoridi (F ⁻)		10	50
Sulfaatti (SO ₄ ²⁻)		1 000	10 000
Kloridi (Cl ⁻)		800	2 400

* laadunvalvontatutkimusten määrittelymenetelmät on esitetty VNa:ssa

2.4 Toimintaketju

Pohjatuhkarakentamisen toimintaketju on esitetty kuvassa 1.



Kuva 1. Pohjatuhkarakentamisen toimintaketju. Sinisellä on esitetty tilaajan toimenpiteet ja keltaisella Lohja Ruduksen. Punaisella on esitetty voimalaitoksen toiminta.

3. Pohjatuhkan käyttö rakentamisessa

Pohjatuhkaa käytetään yleensä samalla tavalla kuin vastaavan rakeisuuden omaavaa luonnon maa- ja kiviainesta (raekokovastaavuus hiekka). Pohjatuhkan pääasialliset käyttökohteet ovat katujen ja kevyenliikenteenväylien suodatinkerroksessa, pengertäytössä, kenttärakenteissa ja muissa täytöissä. Muita käyttökohteita ovat kevyenliikenteenväylän jakava kerros ja putkikaivantojen arinat ja täytöt.

VNa:n vaatimukset täyttävää pohjatuhkaa voidaan käyttää seuraavissa maarakennuskoh-teissa ilman ympäristölupaa:

- yleiset tiet, kadut, pyörätiet ja jalkakäytävät sekä niihin välittömästi liittyvät tienpi-toa tai liikennettä varten tarpeelliset alueet, pois lukien meluesteet,
- pysäköintialueet,
- urheilukentät sekä virkistys- ja urheilualueiden reitit,
- ratapihat sekä teollisuus, jätteenkäsittely- ja lentoliikenteen alueiden varastointi-kentät ja tiet.

Pohjatuhkan käytöstä maarakentamisessa on tehtävä ilmoitus luvun 4.4 mukaisesti.

4. Rakentaminen pohjatuhkalla

4.1 Pohjatuhkan toimitus ja vastaanotto

Lohja Rudus toimittaa tai asiakas noutaa työmaalle pohjatuhkaa tilauksen mukaisesti. Pohjatuhkan toimittajana Lohja Rudus vastaa siitä, että materiaalin laatuvaatimukset täyttyvät toimitettaessa.

Tilaaaja vastaanottaa, tarkastaa ja hyväksyy materiaalin laadun Lohja Ruduksen toimi-tusehtojen mukaisesti.

4.2 Työohjeita

Soveltuvuus

Pohjatuhkarakenteessa mahdollisesti olevat korroosiolle alttiit rakenteet on suojattava suoralta kosketukselta ja suotautuvan veden vaikutukselta käyttämällä pinnoitteita tai syöpymättömiä materiaaleja. Kupari, haponkestävä teräs, lyijy, betoni ja muovi kestävät käytössä pohjatuhkan mahdolliset vaikutukset. Sen sijaan valurauta, teräs ja alumiini syöpyvät voimakkaasti.

Kuljetus, välivarastointi ja levitys

Pohjatuhkan kuljetus, levitys ja tiivistys tehdään tavallisella maarakennuskalustolla.

Pohjatuhkan kuljetuksessa on estettävä pölyäminen. Kuorma on tarvittaessa kasteltava pinnalta tai peitettävä pressuilla.

Pohjatuhkaa voidaan välivarastoida työmaalla seuraavasti:

- alle 4 vko varastokasalla,
- 4 vko – 10 kk varastokasalla suojattuna.

Tiivistäminen

Pohjatuhkarakenteen päällä voi kevyt työmaaliikenne kulkea heti materiaalin levityksen ja esitiivistyksen jälkeen, kun kantavuus on todettu suunnitellun mukaiseksi.

Pohjatuhkan levittäminen ja tiivistäminen tehdään enintään 0,2–0,4 m kerroksina (löyhänä 0,3–0,5 m). Pohjatuhkakerros tiivistetään tavanomaisella tiivistyslaitteistolla (esim. valssijyrä, tärylevy tai hydraulitärytin). Tiivistämiskertojen lukumääräksi suositellaan noin 6–8 yliajokertaa tiivistyslaitteesta riippuen. Tiivistystyön määrä arvioidaan tapauskohtaisesti ja rakenteen tiiveys tarkastetaan laadunvalvonnalla. Materiaalina pohjatuhka on hyvin tiivistyvää.

Tiekohteissa pohjatuhkan tiivistäminen vaatii sivuttaistuet reunapenkereestä tiivistykseen riittävästi. Reunatuot tiivistetään ennen pohjatuhkan levittämistä.

Liittyminen muihin rakennekerroksiin

Pohjatuhkarakenne tulee tiivistämisen jälkeen päällystää tai peittää mahdollisimman pian pölyämisen estämiseksi ja suojaan mekaaniselta rasitukselta. Rakenne voidaan suojata ohuella murske- tai hiekkakerroksella tai muulla tarkoitukseen soveltuvalla materiaalilla.

Pohjatuhkan tiivistäminen ohuen murskekerroksen päältä parantaa tiivistystulosta ja toimii sääsuojana.

Laadunvalvonta

Pohjatuhkarakenteen laadunvalvonnassa käytetään pääsääntöisesti samoja menetelmiä ja laatuvaatimuksia kuin käytettäessä luonnon maa- ja kiviaineksia. Rakenteen tiiviysaste voidaan todeta tiiviysmittauksilla (volymetri, pohjatuhkalle kalibroitu Troxler) tai kantavuusmittauksilla (Loadman, levykuormitus- tai pudotuspainokoe) todettavan tiiviys-suhteen perusteella. Levykuormituslaitteella tiiviys-suhteen on oltava $E_2/E_1 \leq 2,2$ ja pudotuspainolaitteella määritettynä pienempi; yleensä $E_2/E_1 \leq 1,7 \dots 2,2$. InfraRYL 2006 osassa 2 tiiviys-suhtevaatus tarkentuu.

4.3 Erot luonnon maa- ja kiviaineksiin

Pohjatuhkalla rakentaminen poikkeaa vain vähän luonnon maa- ja kiviaineksen käyttämisestä maarakennusmateriaalina. Seuraavat ominaisuudet eroavat luonnon maa- ja kiviaineksilla rakentamisesta:

VNa:n vaatimukset:

- pohjatuhkaa ei saa käyttää I–II -luokan pohjavesialueilla,
- pohjatuhkarakenne tulee päällystää (asfaltin tyhjätila $\leq 5\%$) tai peittää kiviaineksilla (paksuus $\geq 10\text{ cm}$),
- pohjatuhkarakenteen kerrospaksuus on rajoitettu enimmillään 1,50 m,
- hyödyntämispaikan haltijan on hyväksyttävä pohjatuhkan käyttö,
- pohjatuhkan käyttö edellyttää ilmoituksen tekemistä luvun 4.4 mukaisesti.

Teknisiä käyttöohjeita:

- pohjatuhka ei sovellu käytettäväksi sille korroosioherkkien materiaalien kanssa ilman suojausta suoralta kosketukselta ja suotautuvan veden vaikutukselta,
- tiivistetyn pohjatuhkapinnan kaltevuudeksi suositellaan vähintään 3 % (minimissään 1 %),
- pohjatuhkarakennetta ei tule rakentaa avoveteen tai liettyneen pohjamaan päälle,
- jäätynyttä pohjatuhkaa ei tule käyttää rakentamiseen,
- rakenteen huolellinen tiivistäminen on edellytys tiiviys- ja kantavuusvaatimusten täyttymiseen.

4.4 Ilmoitusmenettely

Pohjatuhkan käytöstä on tehtävä ilmoitus alueelliselle ympäristökeskukselle VNa:n mukaisesti. Lohja Rudus on varautunut tekemään ilmoituksen asiakkaansa puolesta, mutta asiakas voi tehdä sen myös itse. Asiakas vastaa ilmoittamiensa tietojen oikeellisuudesta.

Ilmoituksen tulee sisältää seuraavat tiedot:

- hyödyntämispaikan haltijan nimi ja yhteystiedot,
- hyödyntämispaikan sijainti sekä selvitys lähialueen pohjavesialueista ja niiden luokista sekä vedenottopaikoista ja vesistöistä,
- tiedot maarakentamista koskevasta maankäyttö- ja rakennuslain, yleisistä teistä annetun lain tai maantielain mukaisesta suunnitelmasta, ilmoituksesta tai luvasta,
- Lohja Ruduksen yhteyshenkilön nimi ja yhteystiedot,
- jätenimike ja laadunvalvontatiedot materiaalitoimittajalta,
- käytettävän pohjatuhkan määrä,
- selvitys pohjatuhkaa sisältävästä rakenteesta, peittämiseen tai päällystämiseen käytettävästä materiaalista, varastoinnista ja muusta toiminnasta hyödyntämispaikalla sekä näihin liittyvistä tarpeellisista suojaustoimista,
- ajankohta, jolloin hyödyntäminen maarakentamisen aikana alkaa ja päättyy.

4.5 Työsuojelu

Pohjatuhka sisältää pieniä määriä ihoa mahdollisesti ärsyttäviä komponentteja. Ihoaltistuksen vuoksi suoraa ihokosketusta on vältettävä ja suojakäsineiden sekä asianmukaisen työvaatetuksen käyttö on suositeltavaa. Iholta tuhka pestään pois saippualla. Silmiin joutunut tuhka huuhdotaan välittömästi runsaalla vedellä ja otetaan jatkotoimenpiteitä varten yhteys lääkäriin.

5. Rakenteen suunnittelu pohjatuhkalla

5.1 Päällysrakenne

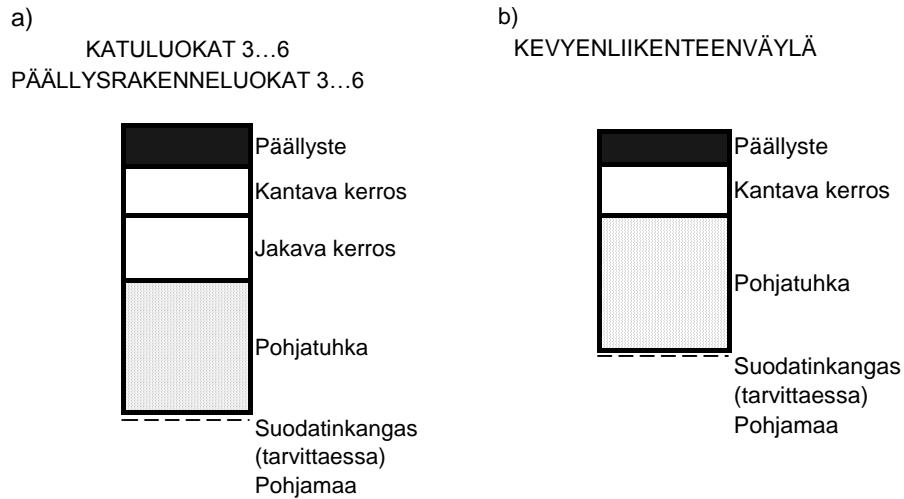
Pohjatuhkarakenteiden suunnitteluun riittävät samantasoiset lähtötiedot ja korjauskoh-teissa myös nykytilan tiedot kuin luonnon maa- tai kiviainesrakennetta suunniteltaessa.

Pohjatuhkaa on teknisesti mahdollista käyttää mm. päällysrakenteen suodatinkerroksessa, katu- ja päällysrakenneluokkien 3...6 jakavan kerroksen alaosassa sekä alemman kantavuusvaatimuksen rakenteissa.

Pohjatuhkarakenteen mitoitus tehdään Odemarkin mitoitusyhtälöllä. Mitoituksessa käytetään pohjatuhkan E-moduulina 50 MPa.

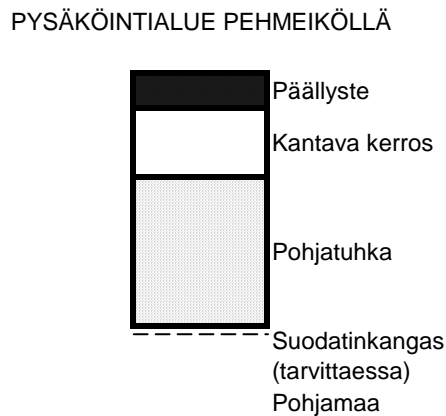
Routamitoitus tehdään tie- ja katurakenteille, joissa on käytetty pohjatuhkaa InfraRYL:n mukaisesti kuten luonnon maa- ja kiviaineksia käytettäessä.

Rakenne-esimerkit katuluokka 3...6 päällysrakenteelle ja kevyenliikenteenväylälle on esitetty kuvassa 2.



Kuva 2. Rakenne-esimerkit katuluokan 3...6 ja päällysrakenluokan 3...6 päällysrakenteelle (kuva 2a) ja kevyenliikenteenväylälle (kuva 2b).

Rakenne-esimerkki pysäköintialueen päällysrakenteelle pehmeiköllä on esitetty kuvassa 3.



Kuva 3. Rakenne-esimerkki pysäköintialueen päällysrakenteesta pehmeiköllä.

Muita mitoitus esimerkkejä on esitetty luvun 7 kirjallisuusviitteissä.

5.2 Alusrakenne, täyttötööt ja putkikaivannot

Alusrakenne, täyttötööt ja putkikaivannot suunnitellaan tätä ohjetta soveltaen.

6. Pohjatuhkan tilaaminen ja saatavuus

Pohjatuhkaa myydään Etelä-Suomessa sopimuksen mukaan. Pohjatuhkan varastotilanne vaihtelee huomattavasti vuodenajan mukaan ja siksi saatavuus on syytä varmistaa etukäteen. Tilaaminen ja reaaliaikainen pohjatuhkan saatavuus paikkakunnittain selviää Lohja Ruduksen yhteyshenkilöiltä:

Aluepäällikkö	Petri Ilama
puh.	020 447 7531, 040 725 4435
email	petri.ilama@lohjarudus.fi
Tuotepäällikkö	Tuomo Joutsenoja
puh.	020 447 7274, 0400 929 149
email	tuomo.joutsenoja@lohjarudus.fi
Tuoteryhmäpäällikkö	Antti Määttänen
puh.	020 447 6806, 040 539 3534
email	antti.maattanen@lohjarudus.fi

Lohja Rudus Oy Ab

Lentotuhkaohje

Käyttöohje rakentamiseen ja suunnitteluun

15.2.2007

Viite	82113199
Versio	Koekäyttöön
Pvm	15.2.2007
Hyväksynyt	Antti Määttänen
Tarkistanut	Jorma Havukainen, Juha Forsman, Antti Määttänen, Petri Ilama, Tuomo Joutsenoja
Kirjoittanut	Miikka Hakari

1. Johdanto

Lentotuhka on energiantuotannon sivutuotteena syntyvä mineraalinen materiaali, jota voidaan käyttää maarakentamisessa. Lentotuhkaa käyttämällä korvataan luonnon maa- ja kiviaineksia. Lohja Ruduksen toimittaman kivihiilivoimalaitoksen lentotuhkan ominaisuudet ja laatu vastaavat Valtioneuvoston asetus eräiden jätteiden hyödyntämisestä maarakentamisessa [VNa 591/2006] vaatimuksia.

Lentotuhka soveltuu tämän ohjeen mukaisesti käytettynä samoihin kohteisiin kuin vastaavat toiminnalliset ominaisuudet omaava luonnon maa- ja kiviaines. Pääasialliset käyttökohteet ovat pihojen ja kenttien päällysrakenteen alaosa ja alusrakennekerrokset. Lentotuhkaa voidaan käyttää myös tie- ja katurakenteiden jakavassa kerroksessa ja kevyenliikenteenväylien jakavassa kerroksessa.

Tämä ohje on Lohja Ruduksen käyttöohje lentotuhkan hyödyntämisestä maarakentamisessa VNa:n vaatimusten mukaisesti. Muita tuhkaohjeita ovat mm. ”Helsingin kaupungin tuhkarakentamisohje” [Helsingin kaupunki 2001], ”Tuhkan maarakentamisohje” [Espoon kaupunki, Espoon Sähkö Oy 2000], ”Tuhkarakentamisohje tie-, katu- ja kenttärakenteisiin” [Finergy 2000] ja Tuhkaprojektin loppuraportti [Helsingin kaupungin kiinteistövirasto 1987].

Lohja Ruduksen toimittamaa lentotuhkaa käytettäessä on tämä ohje ensisijainen.

Yleisiä maarakentamisen ohjeita ovat mm. ”Infrarakentamisen yleiset laatuvaatimukset” [InfraRYL 2006] ja ”Talonrakennuksen maarakenteet – yleinen rakennusselostus ja laatuvaatimukset” [RIL 132–2000].

2. Lentotuhkat

2.1 Lentotuhkan synty

Lentotuhka syntyy kivihiilen palamistuotteena ja se erotetaan savukaasuista sähkö- tai letkusuodattimilla. Lentotuhka kerätään suodattimista voimalaitoksen varastosiiloihin, joista se puretaan kuljetusvälineeseen hyötykäyttöä varten. Lentotuhkaa voidaan varastoida myös kasoissa, jolloin sen tekniset ominaisuudet poikkeavat siilovarastoidun tuhkan ominaisuuksista.

2.2 Tekniset ominaisuudet ja laatuvaatimukset

Lentotuhkan geotekniset perusominaisuudet on esitetty taulukossa 1.

Taulukko 1. Lentotuhkan geotekniset perusominaisuudet.

Ominaisuus	Lentotuhka
Pääasiallinen käyttökohde	jakavakerros
Rakeisuus	0,002–0,1 mm (raekokovastaavuus siltti)
Lujittuminen	siilossa varastoitu lujittuu *, kasavarastoidun lujittuminen vaihtelee
Routivuus	routivaa lujittumattomana, lujittuneena routivuus vaihtelee routimattomasta routivaan
Optimivesipitoisuus **	21,5 ± 3,5 %
Maksimikuivatilavuuspaino	13,5 ± 1,5 kN/m ³
Puristuslujuus 1- aks. (28 d)	> 0,5 MPa *
E-moduuli	kasavarastoitu 50–150 MPa, siilovarastoitu ja rakenteessa lujittunut 150–350 MPa
Kitkakulma	28–36°, lujittuneena 49–77°
Koheesio	23–47 kPa, lujittuneena 64–490 kPa
Vedenläpäisevyys	lujittumattomana 10 ⁻⁶ –10 ⁻⁷ m/s, lujittuneena 10 ⁻⁶ –10 ⁻⁸ m/s
Lämmönjohtavuus ***	hyvin tiivistettynä 0,4–1,0 W/mK

- * normaaleissa käyttöolosuhteissa ohjeen mukaisesti rakennettuna sekä ohjeen mukaisessa vesipitoisuudessa ja tiiveydessä
- ** eräkohtainen optimivesipitoisuus toimitetaan pyydettyäessä
- *** vesipitoisuus ja jäätyminen vaikuttavat lämmönjohtavuuteen

Lentotuhkan geoteknisiä ominaisuuksia voidaan parantaa sekoittamalla tuhkaan betoni-mursketta, kalkkia, sementtiä tai muita sideaineita VN:n periaatteiden mukaisesti.

2.3 Ympäristökelpoisuus ja laatuvaatimukset

Lohja Ruduksen toimittama lentotuhka täyttää Valtioneuvoston asetuksen [VN 591/2006] vaatimukset.

VN:n määrittelemät, lentotuhkan laadunvalvontatutkimusten haitallisten aineiden pitoisuuden ja liukoisuuden raja-arvot on esitetty taulukossa 2.

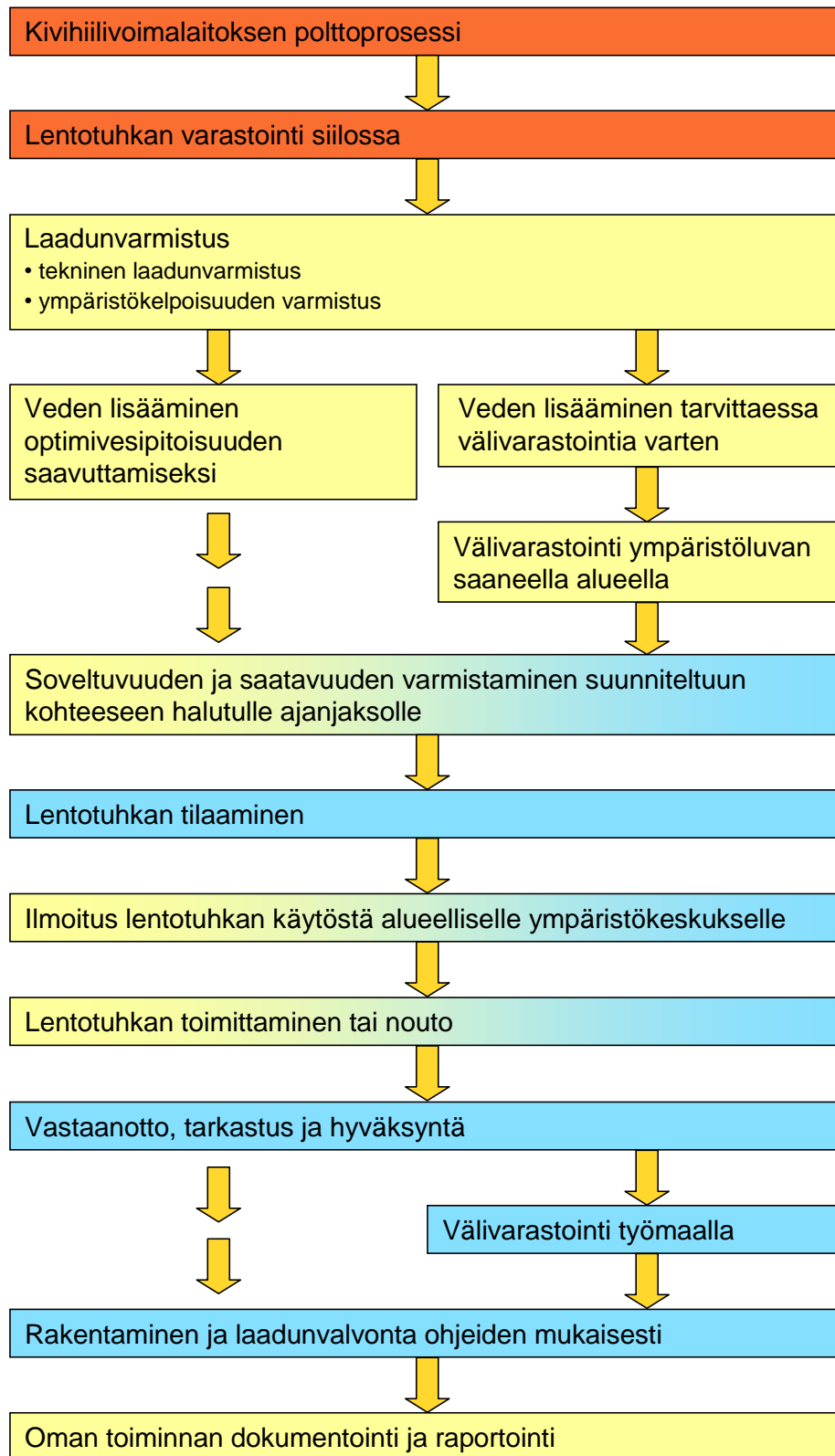
Taulukko 2. Lentotuhkan haitallisten aineiden pitoisuuden ja liukoisuuden raja-arvot laadunvalvontatutkimuksissa [VNa 591/2006].

Haitallinen aine	Raja-arvo, mg/kg kuiva-ainetta		
	Laadunvalvontatutkimukset		
	Pitoisuus *	Liukoisuus * (L/S = 10 l/kg) Peitetty rakenne	Liukoisuus * (L/S = 10 l/kg) Päällystetty rakenne
Arseeni (As)	50		
Barium (Ba)	3 000		
Kadmium (Cd)	15		
Kromi (Cr)	400	0,5	3,0
Kupari (Cu)	400		
Lyijy (Pb)	300	0,5	1,5
Molybdeeni (Mo)	50	0,5	6,0
Vanadiini (V)	400	2,0	3,0
Sinkki (Zn)	2 000		
Seleeni (Se)		0,1	0,5
Fluoridi (F ⁻)		10	50
Sulfaatti (SO ₄ ²⁻)		1 000	10 000
Kloridi(Cl ⁻)		800	2 400

* laadunvalvontatutkimusten määrittämenetelmät on esitetty VNa:ssa

2.4 Toimintaketju

Lentotuhkarakentamisen toimintaketju on esitetty kuvassa 1.



Kuva 1. Lentotuhkarakentamisen toimintaketju. Sinisellä on esitetty tilaajan toimenpiteet ja keltaisella Lohja Ruduksen. Punaisella on esitetty voimalaitoksen toiminta.

3. Lentotuhkan käyttö rakentamisessa

Lentotuhkaa käytetään kuten luonnon maa- ja kiviaineksia maarakenteissa. Pääasialliset käyttökohteet ovat pihojen ja kenttien päällysrakenteen alaosa ja alusrakennekerrokset.

Lentotuhkaa voidaan käyttää myös tie- ja katurakenteiden jakavassa kerroksessa ja kevyenliikenteenväylien jakavassa kerroksessa noudattaen kohdekohtaista tuhkarakennesuunnitelmaa sekä pengertäytöissä, putkikaivantojen arinoissa ja täytöissä. Tie- ja katurakenteiden sekä kevyenliikenteenväylän lentotuhkarakenteet on suunniteltava huolellisesti huomioiden rakennus- ja käyttöolosuhteet sekä käytettävän lentotuhkan ominaisuudet.

VNa:n mukaisesti lentotuhkaa voidaan käyttää seuraavissa maarakennuskohteissa ilman ympäristölupaa:

- yleiset tiet, kadut, pyörätiet ja jalkakäytävät sekä niihin välittömästi liittyvät tienpi-toa tai liikennettä varten tarpeelliset alueet, pois lukien meluesteet,
- pysäköintialueet,
- urheilukentät sekä virkistys- ja urheilualueiden reitit,
- ratapihat sekä teollisuus-, jätteenkäsittely- ja lentoliikenteen alueiden varastointi-kentät ja tiet.

Lentotuhkan käytöstä maarakentamisessa on tehtävä ilmoitus luvun 4.4 mukaisesti.

4. Rakentaminen lentotuhkalla

4.1 Lentotuhkan toimitus

Lohja Rudus toimittaa tai asiakas noutaa työmaalle lentotuhkaa tilauksen mukaisesti. Lentotuhkan toimittajana Lohja Rudus vastaa siitä, että materiaalin laatuvaatimukset täyttyvät toimitettaessa.

Tilaaja vastaanottaa, tarkastaa ja hyväksyy materiaalin laadun Lohja Ruduksen toimitusehtojen mukaisesti.

Siilossa ja aumassa varastoitu lentotuhka toimitetaan työmaalle kuorma-autolla ja lentotuhkan vesipitoisuus on toimitushetkellä lähellä optimivesipitoisuutta.

4.2 Työohjeita

Soveltuvuus

Lentotuhkarakenteessa mahdollisesti olevat korroosiolle alttiit rakenteet on suojattava suoralta kosketukselta ja suotautuvan veden vaikutukselta käyttämällä pinnoitteita tai syöpymättömiä materiaaleja. Kupari, haponkestävä teräs, lyijy, betoni ja muovi kestävät käytössä lentotuhkan mahdolliset vaikutukset. Sen sijaan valurauta, teräs ja alumiini syöpyvät voimakkaasti. Lentotuhka sekoitettuna rikinpoistotuotteeseen aiheuttaa syöpymää myös suojaamattomalle kuparille.

Lentotuhkakerrokseen ei saa rakentaa salaojia.

Lentotuhkan lujittumisominaisuutta hyödynnettäessä on ilman ja rakenteen lämpötilan rakennustyön ja lujittumisen aikana (ensimmäiset noin 2–4 viikkoa) oltava yli + 5 °C. Kylmemmässä lämpötilassa lujittumista ei juuri tapahdu, mutta rakenteen lämpötilan noustua ko. arvon yläpuolelle lujittumisprosessi käynnistyy jossain määrin uudelleen, ellei lujittumisprosessia häiritä esim. liikenteen toistuvilla kuormituksilla. Lujittuminen on varmistettava ennen rakenteen käyttöönottoa kantavuusmittauksilla.

Kuljetus, välivarastointi ja levitys

Lentotuhkan kuljetus, levitys ja tiivistys tehdään tavallisella maarakennuskalustolla.

Lentotuhkan kuljetuksessa ja välivarastoinnissa pölyäminen on estettävä. Lentotuhka on tarvittaessa peitettävä pressuilla tai kasteltava pinnalta.

Lentotuhkaa voidaan välivarastoida työmaalla seuraavasti:

- alle 4 vko varastokasalla,
- 4 vko – 10 kk varastokasalla suojattuna.

Lentotuhka levitetään ja tiivistetään heti rakentamispaikalle tuonnin jälkeen. Tuhkarakentamisen aikataulua on muutettava jos levitys tai tiivistys ajoittuu voimakkaalle tai pitkäaikaiselle sateelle, koska lentotuhka lietty liian kosteana.

Tiivistäminen

Lentotuhkakerros saattaa tiivistyä epätasaisesti ensimmäisellä tiivistyskerralla, joten rakentamisessa on syytä varautua pinnan tasoitukseen esimerkiksi tiehöylällä ja tuhkaa lisäämällä.

Lentotuhka suositellaan tiivistettävän 0,2–0,25 m kerroksissa (löyhänä 0,3–0,4 m). Ohuemmat kerrokset hidastavat työtä ja paksummat kerrokset aiheuttavat ongelmia tassaustyössä, muotoilussa ja tiivistystyössä. Lentotuhkarakenne tiivistetään tavanomaisella tiivistyslaitteistolla (esim. valssijyrä, tärylevy). Tiivistämiskertojen lukumääräksi suositellaan noin 6–8 yliajokertaa tiivistyslaitteistosta riippuen. Tiivistystyön määrä arvioidaan tapauskohtaisesti ja rakenteen tiiviys tarkastetaan laadunvalvonnalla.

Reuna-alueilla lentotuhkan tiivistäminen vaatii sivuttaistuet reunapenkereestä tiivistykseen riittävästi. Reunatuet tiivistetään ennen lentotuhkan levittämistä.

Lentotuhkakerroksen pinta tulee karhentaa ennen seuraavan tuhkakerroksen tekemistä, jotta mahdollisia routalinssejä ei pääse muodostumaan lentotuhkakerrosten rajapintoihin.

Suojaaminen

Lentotuhkarakenne tulee tiivistämisen jälkeen päällystää tai peittää mahdollisimman pian pölyämisen tai liiallisen kastumisen estämiseksi ja suojaan mekaaniselta rasitukselta. Rakenne voidaan suojata ohuella murskekerroksella tai muulla tarkoitukseen soveltuvalla materiaalilla.

Mikäli rakentaminen keskeytetään sateen takia, on jo tiivistetty ja levitetty tuhkakkerros suojattava esim. murskeella tai pressuilla.

Lentotuhkan tiivistäminen ohuen murskekerroksen päältä parantaa tiivistystulosta ja toimii sääsuojana. Lisäksi murske toimii päällysteen tartuntapintana.

Laadunvalvonta

Lentotuhkarakenteen laadunvalvonnassa käytetään pääsääntöisesti samoja menetelmiä ja laatuvaatimuksia kuin käytettäessä luonnon maa- ja kiviaineksia. Rakenteen tiiviysaste voidaan todeta tiiviysmittauksilla (volymetri, lentotuhkalle kalibroitu Troxler) tai kantavuusmittauksilla (Loadman, levykuormitus- tai pudotuspainolaite) todettavan tiiviys-suhteen perusteella. Levykuormituslaitteella tiiviys-suhteen on oltava $E_2/E_1 \leq 2,2$ ja pudotuspainolaitteella määritettynä pienempi; yleensä $E_2/E_1 \leq 1,7 \dots 2,2$. InfraRYL 2006 osassa 2 tiiviys-suhtevaatus tarkentuu. Tuhkarakenteen reuna-alueiden tiiviyteen on kiinnitettävä erityistä huomiota.

4.3 Erot luonnon maa- ja kiviaineksiin

Lentotuhkalla rakentaminen poikkeaa joiltakin osin luonnon maa- ja kiviaineksen käyttämisestä maarakennusmateriaalina. Seuraavat ominaisuudet eroavat luonnon maa- ja kiviaineksilla rakentamisesta:

VNa:n vaatimukset:

- lentotuhkaa ei saa käyttää I–II -luokan pohjavesialueilla,
- lentotuhkarakenne tulee päällystää (asfaltin tyhjätila $\leq 5 \%$) tai peittää kiviaineksilla (paksuus ≥ 10 cm),
- lentotuhkarakenteen kerrospaksuus on rajoitettu enimmillään 1,50 m,
- hyödyntämispaikan haltijan on hyväksyttävä lentotuhkan käyttö,
- lentotuhkan käyttö edellyttää ilmoituksen tekemistä luvun 4.4 mukaisesti.

Tekniset vaatimukset:

- lentotuhka ei sovellu käytettäväksi sille korroosioherkkien materiaalien kanssa ilman suojausta suoralta kosketukselta ja suotautuvan veden vaikutukselta,
- lentotuhkarakennetta ei tule rakentaa avoveteen tai liettyneen pohjamaan päälle,
- lentotuhka soveltuu huonosti rakennuskohteeseen, joka kaivetaan auki toistuvasti,
- jäätynyttä lentotuhkaa ei tule käyttää rakentamiseen,
- rakenteen huolellinen tiivistäminen on edellytys tiiviys- ja kantavuusvaatimusten täyttymiseen,
- yli ± 5 % optimivesipitoisuudesta poikkeavien lentotuhkamassojen käyttämisestä rakentamisessa päättää työmaavastaava tapauskohtaisesti ottaen huomioon mahdolliset ongelmat materiaalin tiivistämisessä,
- tiivistetyn lentotuhkapinnan kaltevuuden tulee olla vähintään 3 %,
- lentotuhkarakenteen minimipaksuudeksi suositellaan vähintään 0,2 m.

4.4 Ilmoitusmenettely

Lentotuhkan käytöstä on tehtävä ilmoitus alueelliselle ympäristökeskukselle VNa:n mukaisesti. Lohja Rudus on varautunut tekemään ilmoituksen asiakkaansa puolesta, mutta asiakas voi tehdä sen myös itse. Asiakas vastaa ilmoittamiensa tietojen oikeellisuudesta.

Ilmoituksen tulee sisältää seuraavat tiedot:

- hyödyntämispaikan haltijan nimi ja yhteystiedot,
- hyödyntämispaikan sijainti sekä selvitys lähialueen pohjavesialueista ja niiden luokista sekä vedenottopaikoista ja vesistöistä,
- tiedot maarakentamista koskevasta maankäyttö- ja rakennuslain, yleisistä teistä annetun lain tai maantielain mukaisesta suunnitelmasta, ilmoituksesta tai luvasta,
- Lohja Ruduksen yhteyshenkilön nimi ja yhteystiedot,
- jätenimike ja laadunvalvontatiedot materiaalitoimittajalta,
- käytettävän lentotuhkan määrä,
- selvitys lentotuhkaa sisältävästä rakenteesta, peittämiseen tai päällystämiseen käytettävästä materiaalista, varastoinnista ja muusta toiminnasta hyödyntämispaikalla sekä näihin liittyvistä tarpeellisista suojaustoimista,
- ajankohta, jolloin hyödyntäminen maarakentamisen aikana alkaa ja päättyy.

4.5 Työsuoja

Lentotuhka sisältää pieniä määriä ihoa mahdollisesti ärsyttäviä komponentteja. Ihoaltituksen vuoksi suora ihokosketusta on vältettävä ja suojakäsineiden sekä asianmukaisen työvaatetuksen käyttö on suositeltavaa. Iholta tuhka pestään pois saippualla. Silmiin joutunut tuhka huuhdotaan välittömästi runsaalla vedellä ja otetaan jatkotoimenpiteitä varten yhteys lääkäriin. Kuivaa tuhkaa käsiteltäessä on suositeltavaa käyttää hengityssuojaimia.

5. Rakenteen suunnittelu lentotuhkalla

5.1 Päälysrakenne

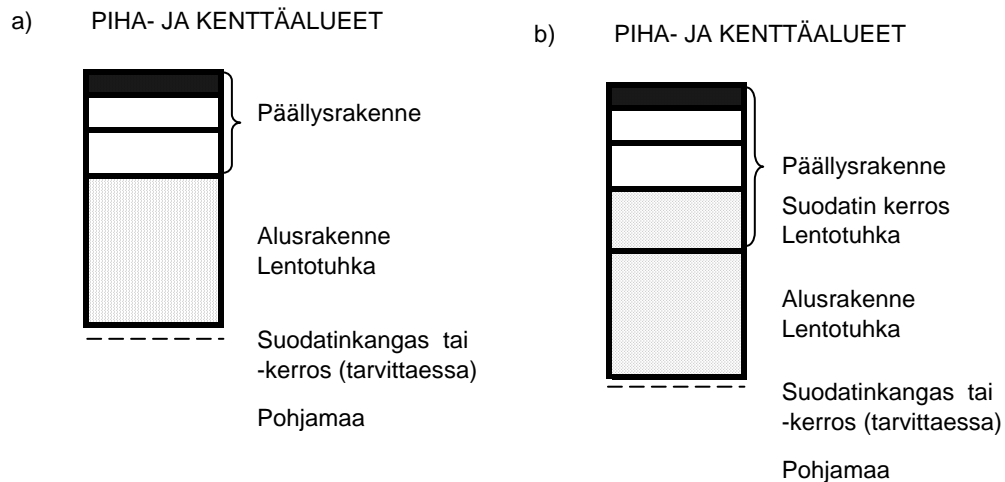
Lentotuhkarakenteiden suunnitteluun riittävät samantasoiset lähtötiedot ja korjauskohteissa myös nykytilan tiedot kuin luonnon maa- tai kiviainesrakennetta suunniteltaessa. Kosteaa ja huonosti kantavan pohjamaan päällä on käytettävä vähintään 0,3 m suodatinkerrosta ja tarvittaessa myös suodatinkangasta.

Lujittuvaa, siilossa varastoitua lentotuhkaa voidaan käyttää kaikissa tien ja kadun päälysrakennekerroksissa; suodatinkerrosta vastaavassa kerroksessa, jakavassa kerroksessa ja kantavan kerroksen alaosassa. Kantavassa kerroksessa käyttäminen vaatii yksityiskohdista mitoitusta, tuhkan ominaisuuksien tutkimista ja erityisen huolellista rakentamista. Lujittumatonta tai heikosti lujittuvaa, kasavarastoitua tuhkkaa voidaan käyttää pengertäytyessä ja alempiluokkaisten rakenteiden jakavassa kerroksessa.

Lentotuhkaa käytettäessä voidaan lujittumisesta huolimatta koko päälysrakennetta pitää joustavana päälysrakenteena. Mitoitus tehdään Odemarkin mitoitusyhtälöllä. Päälysrakenteen mitoituksessa käytetään siilovarastoidun lentotuhkan E-moduulina 200 MPa. Kasavarastoidun lentotuhkan mitoitusmoduuli ilmoitetaan Lohja Ruduksen toimesta tapauskohtaisesti tuhkan varastointiajasta ja -olosuhteista riippuen.

Kantavuusvaatimusten mukaan mitoitettut päällysrakenteet katu- ja päällysrakenneluokille on esitetty julkaisuissa ”Tuhkarakentamisohje tie-, katu- ja kenttärakenteisiin” [Finergy 2000] ja ”Helsingin kaupungin tuhkarakentamisohje” [Helsingin kaupunki 2001]. Valmiiksi mitoitettuja rakenteita voi käyttää tapauskohtaisesti harkiten.

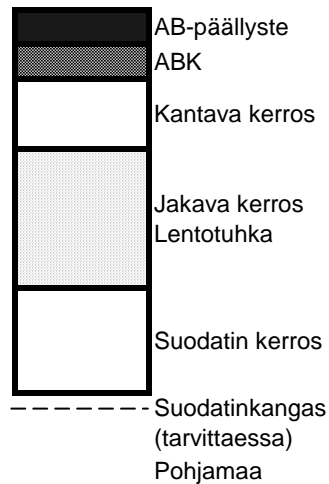
Rakenne-esimerkkejä pihojen ja kenttien päällys- ja alusrakenteelle on esitetty kuvissa 2a ja 2b.



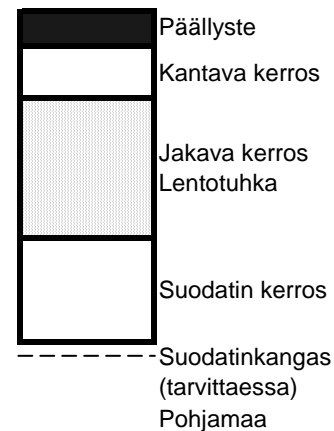
Kuva 2. Rakenne-esimerkki pihojen ja kenttien päällys- ja alusrakenteelle. Kuvassa 2a alusrakenne ja kuvassa 2b alusrakenne ja päällysrakenteen alaosa on rakennettu lentotuhkalla.

Rakenne-esimerkkejä kaduille ja teille on esitetty kuvissa 3a ja 3b.

a) KATULUOKAT 1...3
PÄÄLLYSRAKENNELUOKAT 1..2



b) KATULUOKAT 3...6
PÄÄLLYSRAKENNELUOKAT 3...6



Kuva 3. Rakenne-esimerkki katuluokille 1...3 ja päällysrakenneluokille 1...2 (kuva 3a) sekä katuluokille 3...6 ja päällysrakenneluokille 3...6 (kuva 3b). AB-päällystettä suositellaan käytettäväksi vilkasliikenteisillä pääkaduilla.

Runsaasti suolattavilla, vilkasliikenteisillä korkealuokkaisilla kaduilla ja teillä, joilla käytetään lujittuvaa lentotuhkaa suoran päällysteen alla, on käytettävä vedenläpäisevyydeltään tiiviimpää AB-päällystettä, jonka tyhjätilan on oltava $< 5 \%$.

Koska lentotuhkakerroksen vedenläpäisevyys on pienempi kuin luonnon maa- ja kiviaineksella, tulee pinnan sivukallistuksen olla $\geq 3 \%$ (myös tien painumisen jälkeen).

Routamitoitus tie- ja katurakenteille, joissa on käytetty lentotuhkaa, tehdään InfraRYL:n mukaisesti kuten luonnon maa- ja kiviaineksia käytettäessä.

5.2 Alusrakenne, täyttötööt ja putkikaivannot

Alusrakenne, täyttötööt ja putkikaivannot suunnitellaan tätä ohjetta soveltaen.

6. Lentotuhkan tilaaminen ja saatavuus

Lentotuhkaa myydään Etelä-Suomessa sopimuksen mukaan. Lentotuhkan varastotilanne vaihtelee huomattavasti vuodenajan mukaan ja siksi saatavuus on syytä varmistaa etukäteen. Tilaaminen ja reaaliaikainen lentotuhkan saatavuus paikkakunnittain selviää Lohja Ruduksen yhteyshenkilöiltä:

Aluepäällikkö	Petri Ilama
puh.	020 447 7531, 040 725 4435
email	petri.ilama@lohjarudus.fi
Tuotepäällikkö	Tuomo Joutsenoja
puh.	020 447 7274, 0400 929 149
email	tuomo.joutsenoja@lohjarudus.fi
Tuoteryhmäpäällikkö	Antti Määttänen
puh.	020 447 6806, 040 539 3534
email	antti.maattanen@lohjarudus.fi

Lohja Rudus Oy Ab

Betoroc-ohje

Käyttöohje rakentamiseen ja suunnitteluun

5.3.2007

Viite	82113199
Versio	Koekäyttöön
Pvm	5.3.2007
Hyväksynyt	Antti Määttänen
Tarkistanut	Antti Määttänen, Juha Forsman, Jorma Havukainen, Petri Ilama ja Tuomo Joutsenoja
Kirjoittanut	Miikka Hakari

1. Johdanto

Betoroc-murske on Lohja Ruduksen valmistama, tuotteistettu betonimurske, jota käytetään luonnon maa- ja kiviaineksen tapaan. Betoroc-murske valmistetaan siten, että sen ominaisuudet ja laatu vastaavat ”Valtioneuvoston asetus eräiden jätteiden hyödyntämisestä maarakentamisessa” [VNa 591/2006] vaatimuksia.

Betoroc-murskeiden pääasialliset käyttökohteet ovat katu-, tie- ja kenttärakenteiden jakavat ja kantavat kerrokset. Betoroc-murskeita voidaan käyttää myös erilaisissa täyttöissä, putkijohtokaivantojen täytteenä jne.

Betoroc-murskeilla on lujittuneena mahdollista saavuttaa parempia kantavuuksia kuin vastaavalla kalliomurskeella. Lujittuminen perustuu sitoutumattoman sementin murskauksessa syntyvien reaktiopintojen sitoutumiseen. Käytännössä suurin osa Betoroc-murskeista käytetään luonnon maa- ja kiviaineksen tavoin (rakennetaan rakenneosaa, esim. kantava tai jakava kerros Betoroc-murskeesta).

Tämä ohje on Lohja Ruduksen käyttöohje Betoroc-murskeen hyödyntämisestä maarakentamisessa VNa:n vaatimusten mukaisesti. Muita betonimurske-ohjeita ovat mm. ”Betonimurske kadun päällysrakenteessa 2000” [Suomen Kuntaliitto 2000] ja ”Betonimurskeen käyttö tien päällysrakennekerroksissa” [Tiehallinto 2000].

Lohja Ruduksen toimittamaa Betoroc-mursketta käytettäessä on tämä ohje ensisijainen.

Yleisiä maarakentamisen ohjeita ovat mm. ”Infrarakentamisen yleiset laatuvaatimukset” [InfraRYL 2006] ja ”Talonrakennuksen maarakenteet – yleinen rakennusselostus ja laatuvaatimukset” [RIL 132–2000].

2. Betoroc-murskeet

2.1 Betoroc-murskeiden luokitus

Betoroc-murskeet ovat murskaamalla, seulomalla tai muulla mekaanisella käsittelyllä kivipohjaisista materiaaleista valmistettuja tuotteita. Betoroc-murskeen raaka-aine on peräisin rakennustyömailta, purkutyömailta tai betoniteollisuudesta.

Betoroc-murskeet jaetaan teknisten ominaisuuksien perusteella luokkiin Betoroc M1, Betoroc M2, Betoroc M3, Betoroc M4, Betoroc Hk, Betoroc Sr ja Betoroc Lo.

2.2 Tekniset ominaisuudet ja laatuvaatimukset

Betoroc-murskeiden tekniset perusominaisuudet on esitetty taulukossa 1. Betoroc-murskeiden laadunvalvonnan vaatimukset ja menettelytavat on esitetty Lohja Ruduksen laadunhallintajärjestelmässä.

Taulukko 1. Betoroc-murskeiden perusominaisuuksia.

	Rakeisuus [mm]	Lujittuminen	Routivuus	E-moduuli* [MPa]	Pääasiallinen käyttökohde
Betoroc M1	0/45	lujittuu*	routimaton*	700	kantava kerros
Betoroc M2	0/45	lujittuu*	routimaton*	500	kantava - / jakava kerros
Betoroc M3	0/45	vaihtelee	routimaton*	280(TieH)/ 300(KT)	jakava kerros
Betoroc M4	vaihtelee	vaihtelee	vaihtelee	-	pengertäyte
Betoroc Hk	0/8...0/12	vaihtelee	vaihtelee	50...70	täyte
Betoroc Sr	0/20... 0/65	vaihtelee	vaihtelee	70...150	jakava kerros / pengertäyte
Betoroc Lo	0/90... 0/150	vaihtelee	routimaton*	150...200	penger

* normaaleissa käyttöolosuhteissa ohjeen mukaisesti rakennettuna sekä ohjeen mukaisessa vesipitoisuudessa ja tiiveydessä

Betoroc M1 ja Betoroc M2 murskataan siten, että rakeisuus on InfraRYL:n esittämien kantavan kerroksen kiviainesmurskeen ohjekäyrien alueella. Betoroc M3 murskataan rakeisuudeltaan InfraRYL:n jakavan kerroksen ohjekäyrien alueelle. Betoroc M4, Betoroc Hk, Betoroc Sr ja Betoroc Lo rakeisuusvaatimukset asetetaan tapauskohtaisesti. Betoroc-murskeiden rakeisuus määritetään kuivaseulonnalla.

Betoroc-murskeiden optimivesipitoisuus, maksimikuivatilavuuspaino ja puristuslujuus on esitetty taulukossa 2.

Taulukko 2. Betoroc-murskeiden optimivesipitoisuus, maksimikuivatilavuuspaino ja puristuslujuus.

	Optimivesipitoisuus [%]	Maksimikuivatilavuuspaino [kN/m ³]	Puristuslujuus δ_{28} [MPa]
Betoroc M1	10 ± 2	$19,5 \pm 0,5$	$> 1,2^*$
Betoroc M2	10 ± 2	$19,0 \pm 1,0$	$> 0,8^*$
Betoroc M3	11 ± 3	$19,0 \pm 1,5$	-
Betoroc M4	11 ± 4	$19,0 \pm 1,5$	-
Betoroc Hk	vaihtelee	$18,0 \pm 1,5$	-
Betoroc Sr	vaihtelee	$19,0 \pm 1,5$	-
Betoroc Lo	vaihtelee	$19,0 \pm 1,5$	-

* normaaleissa käyttöolosuhteissa ohjeen mukaisesti rakennettuna sekä ohjeen mukaisessa vesipitoisuudessa ja tiiveydessä

Betoroc M1, Betoroc M2 ja Betoroc M3 vedenläpäisevyys on noin 10^{-5} m/s. Sora- ja kalliomurskeiden vedenläpäisevyys on yleensä $10^{-3} \dots 10^{-4}$ m/s.

Mikäli Betoroc-murskeen lujittuminen hyödynnetään mitoituksessa ja/tai halutaan tarkempaa tietoa materiaalin ominaisuuksista, Lohja Rudus toimittaa nämä tiedot pyydettyessä.

Betoroc-murskeen sisältämän tiilen ja muiden materiaalien maksimiosuudet on esitetty taulukossa 3. Muiden materiaalien osuudet määritetään Lohja Ruduksen laadunvalvontajärjestelmän mukaisesti.

Taulukko 3. Betoroc-murskeiden sisältämien tiilen ja muiden materiaalien maksimiosuudet.

	Tiilen max. osuus [paino-%] *	muiden materiaalien osuus [paino-%] **
Betoroc M1	0	0,5
Betoroc M2	10	1
Betoroc M3	10	1
Betoroc M4	30	1
Betoroc Hk	10	1
Betoroc Sr	30	1
Betoroc Lo	10	1

* tiili, laasti, kevytbetoni

** puu, muovi, yms. ja tämän lisäksi erityisen keveitä materiaaleja ei saa olla haitallisessa määrin

2.3 Ympäristökelpoisuus ja laatuvaatimukset

Betoroc-murskeet on valmistettu siten, että ne täyttävät Valtioneuvoston asetuksen [VNa 591/2006] vaatimukset.

VNa:n määrittelemät, betonimurskeen laadunvalvontatutkimusten haitallisten aineiden pitoisuuden ja liukoisuuden raja-arvot on esitetty taulukossa 4.

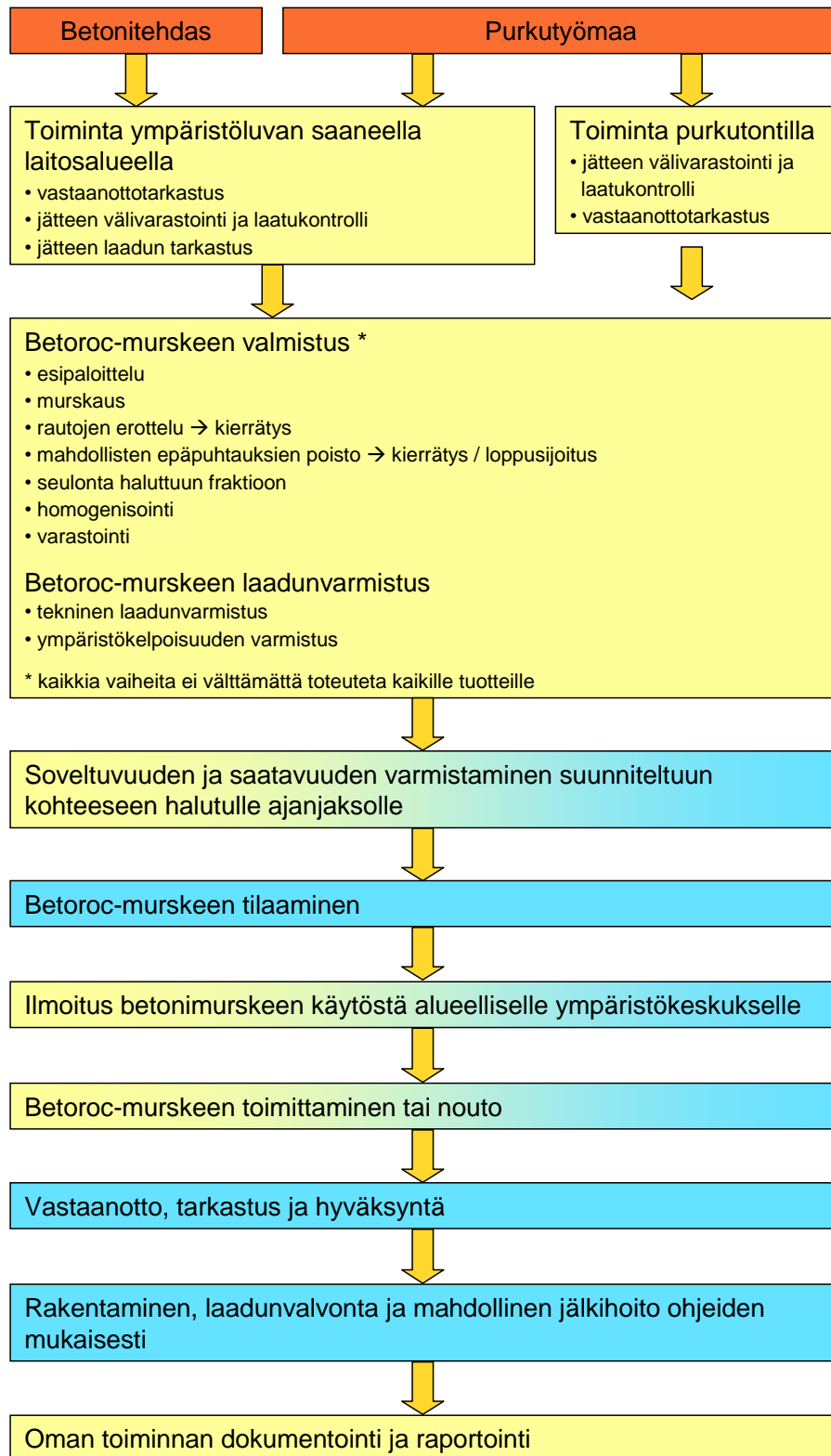
Taulukko 4. Betonimurskeen haitallisten aineiden pitoisuuden ja liukoisuuden raja-arvot laadunvalvontatutkimuksissa [VNa 591/2006].

Haitallinen aine	Raja-arvo, mg/kg kuiva-ainetta		
	Laadunvalvontatutkimukset		
	Pitoisuus *	Liukoisuus * (L/S = 10 l/kg) Peitetty rakenne	Liukoisuus * (L/S = 10 l/kg) Päällystetty rakenne
PCB	1,0		
Arseeni (As)	50		
Kadmium (Cd)	10	0,02	0,02
Kromi (Cr)	400	0,5	0,5
Kupari (Cu)	400	2,0	2,0
Elohopea (Hg)			
Lyijy (Pb)	300	0,5	0,5
Sinkki (Zn)	700		
Sulfaatti (SO ₄ ²⁻)		1 000	3 000

* laadunvalvontatutkimusten määrittämenetelmät on esitetty VNa:ssa

2.4 Toimintaketju

Betoroc-murskeella rakentamisen toimintaketju on esitetty kuvassa 1.



Kuva 1. Betoroc-murskeella rakentamisen toimintaketju. Sinisellä värillä on esitetty tilaajan toimenpiteet ja keltaisella Lohja Ruduksen. Punaisella on esitetty Betoroc-murskeen alkuperä.

3. Betoroc-murskeen käyttö maarakentamisessa

Betoroc-mursketta käytetään yleensä samalla tavalla kuin luonnon maa- ja kiviainesta. Betoroc-murskeen pääasialliset käyttökohteet ovat katu-, tie- ja kenttärakenteiden jakavat ja kantavat kerrokset. Betoroc-mursketta voidaan käyttää myös erilaisissa täyttötöissä ja putkijohtokaivantojen täytteenä.

VNa:n vaatimukset täyttävää betonimursketta voidaan käyttää seuraavissa maarakentamiskohteissa ilman ympäristölupaa:

- yleiset tiet, kadut, pyörätiet ja jalkakäytävät sekä niihin välittömästi liittyvät tienpi-toa tai liikennettä varten tarpeelliset alueet, pois lukien meluesteet,
- pysäköintialueet,
- urheilukentät sekä virkistys- ja urheilualueiden reitit,
- ratapihat sekä teollisuus-, jätteenkäsittely- ja lentoliikenteen alueiden varastointi-kentät ja tiet.

Betoroc-murskeen käytöstä maarakentamisessa on tehtävä ilmoitus luvun 4.4 mukaises-ti.

Betoroc-mursketta on teknisesti mahdollista käyttää kaikissa alus- ja päällysrakenteen kerroksissa, pengertäytteestä ja suodatinkerroksesta kantavaan kerrokseen saakka.

Esimerkkejä Betoroc-murskeiden käytöstä maarakenteissa:

- kantava kerros rakennetaan Betoroc M1:lla tai Betoroc M2:lla,
- jakava kerros rakennetaan Betoroc M2:lla tai Betoroc M3:lla,
- varastokentän täytteenä tai muuna pengermateriaalina käytetään Betoroc M4 tai Betoroc Sr,
- putkijohtokaivannon täytteenä käytetään Betoroc Hk.

Betoroc-murskeiden eri laatuluokkien soveltuvuutta eri rakennekerroksiin on esitetty taulukossa 5.

Taulukko 5. Betoroc-murskeiden soveltuvuutta eri rakennekerrokseen. Sulkuihin merkityt luokat ovat soveltuvia mutta teknisesti tai taloudellisesti usein kannattamattomia.

Rakennekerros	Kantava kerros	Jakava kerros	Täytemateriaali
Betoroc-luokka	Betoroc M1 Betoroc M2 Betoroc M3 *	(Betoroc M1) Betoroc M2 Betoroc M3 Betoroc M4 * Betoroc Sr *	(Betoroc M1) (Betoroc M2) (Betoroc M3) Betoroc M4 Betoroc Hk Betoroc Sr Betoroc Lo

* käyttö suunnitellaan tapauskohtaisesti kohteen olosuhteet, vaatimukset ja muut rakennekerrokset huomioiden

4. Rakentaminen Betoroc-murskeella

4.1 Betoroc-murskeen toimitus ja vastaanotto

Lohja Rudus toimittaa tai asiakas noutaa työmaalle Betoroc-mursketta tilauksen mukaisesti. Murskeen toimittajana Lohja Rudus vastaa siitä, että materiaalin laatuvaatimukset täyttyvät toimitettaessa.

Tilaaja vastaanottaa, tarkastaa ja hyväksyy materiaalin laadun Lohja Ruduksen toimitusehtojen mukaisesti.

4.2 Työohjeita

Kuljetus, välivarastointi ja levitys

Betoroc-murskeen kuljetus, levitys ja tiivistys tehdään kuten luonnon maa- tai kiviainesta käytettäessä tämä ohje huomioiden.

Kaikissa työvaiheissa on huolehdittava siitä, että Betoroc-murskeen lajittumista ei tapahdu. Mikäli näin kuitenkin tapahtuu, on materiaalia sekoitettava työmaalla riittävästi tai korvattava lajittunut materiaali uudella.

Tiivistäminen ja jälkihoito

Tiivistystyö Betoroc-murskeelle tehdään kuten luonnon maa- ja kiviaineksille. Rakenteen tiiviys varmennetaan laadunvalvonnalla. Tiivistystyö on tehtävä optimivesipitoisuudessa, jotta saavutetaan vaadittu tiiviysaste.

Mikäli Betoroc-murskeen lujittuminen hyödynnetään rakenteessa, on jälkihoitona huolehdittava Betoroc-kerroksen riittävän kosteuden ylläpitämisestä Kuntaliiton (KT) tai Tiehallinnon (TieH) betonimurskeohjeiden mukaisesti.

Liittyminen muihin rakennekerroksiin

Betoroc-rakennekerroksen päällä voi liikkua työkoneilla, kun rakenteen kantavuus on todettu suunnitellun mukaiseksi. Ennen liikenteelle avaamista tai ennen raskasta työmaa-liikennettä tulee Betoroc-kerros peittää kalliomurskeella tai asfalttipäällysteellä.

Laadunvalvonta

Betoroc-murskeesta tehdyn rakenteen laadunvalvonnassa käytetään pääsääntöisesti samoja menetelmiä ja laatuvaatimuksia kuin käytettäessä luonnon maa- ja kiviaineksia. Rakenteen tiiviysaste voidaan todeta tiiviysmittauksilla (volymetrikoe, Troxler) tai kantavuusmittauksilla (Loadman, levykuormitus- tai pudotuspainokoe) todettavan tiiviyssuhteen perusteella. Levykuormituslaitteella tiiviyssuhteen on oltava $E_2/E_1 \leq 2,2$ ja pudotuspainolaitteella määritettynä pienempi; yleensä $E_2/E_1 \leq 1,7 \dots 2,2$. InfraRYL 2006 osassa 2 tiiviyssuhdevaatimus tarkentuu.

Mahdollisten kaivutöiden jälkeen Betoroc-murskerakenteen päällysrakenteet on uusittava siten, että päällysrakenteen kerrokset ovat kantavuudeltaan vähintään samat kuin alkuperäiset rakennekerrokset.

4.3 Erot luonnon maa- ja kiviaineksiin

Betoroc-murskeella rakentaminen poikkeaa vain vähän luonnon maa- ja kiviaineksen käyttämisestä maarakennusmateriaalina. Seuraavat ominaisuudet eroavat luonnon maa- ja kiviaineksilla rakentamisesta:

VNa:n vaatimuksia:

- betonimursketta ei saa käyttää I–II -luokan pohjavesialueella,
- betonimurskerakenne tulee päällystää (asfaltin tyhjätila $\leq 5 \%$) tai peittää kiviaineksilla (paksuus ≥ 10 cm),
- betonimurskerakenteen kerrospaksuus on rajoitettu enimmillään 1,50 m,
- hyödyntämispaikan haltijan on hyväksyttävä betonimurskeen käyttö,
- betonimurskeen käyttö edellyttää ilmoituksen tekemistä luvun 4.4 mukaisesti.

Teknisiä käyttöohjeita:

- Betoroc-murske ei sovellu käytettäväksi vedenpinnan alaisissa täyttötöissä, koska hienoaines saattaa liettyä ja kulkeutua veden mukana,
- lujittuvaa Betoroc-mursketta ei voi käyttää putkikaivantojen alkutäytössä (lopputäytössä voidaan yleensä käyttää),
- Betoroc-murskeen korkea alkaalisuus ($\text{pH} > 11$) saattaa kosteissa olosuhteissa aiheuttaa suorassa kontaktissa alumiinin tai galvanoidun teräsputken korroosiota. Tämän takia käyttö esim. edellä mainituista materiaaleista tehtyjen putkien kaivantojen täytöissä on harkittava tapauskohtaisesti ja käytettävä riittäviä suojaetäisyyksiä,
- joustavalle alustalle kuten turpeelle, rengasrouheelle, tms. rakennettaessa, on huolehdittava riittävästä Betoroc-murskeen kerrospaksuudesta ja mitoituksessa on käytettävä alhaista kantavuusmoduulia, jonka maksimiarvo määritellään alemman kerroksen kantavuuden perusteella,
- kuivalle alusrakenteelle rakennettaessa (louhe, kevytsora, yms.) on rakentamis- ja jälkihoitovaiheessa huolehdittava riittävästä kerroksen kastelusta, koska päällystyksen jälkeen Betoroc-murske ei saa kapillaarisesti vettä pohjamaasta,

- tiivistystyötä voidaan nopeuttaa ja tehostaa kastelemalla Betoroc-murske lähelle optimivesipitoisuuttaan ja antamalla veden imeytyä murskeeseen jonkin aikaa (5...15 min) ennen tiivistämistä.

4.4 Ilmoitusmenettely

Betoroc-murskeen käytöstä on tehtävä ilmoitus alueelliselle ympäristökeskukselle VNa:n mukaisesti. Lohja Rudus on varautunut tekemään ilmoituksen asiakkaansa puolesta, mutta asiakas voi tehdä sen myös itse. Asiakas vastaa ilmoittamiensa tietojen oikeellisuudesta. Ilmoitus sisältää seuraavat tiedot:

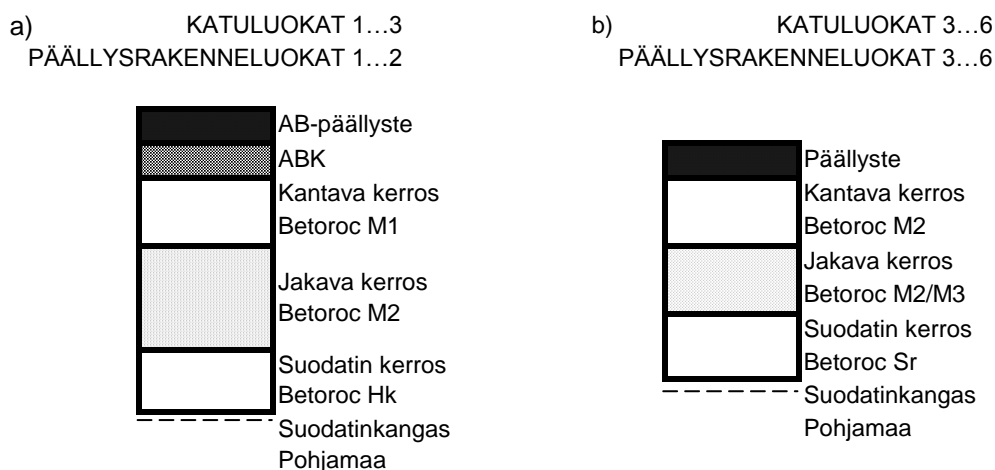
- hyödyntämispaikan haltijan nimi ja yhteystiedot,
- hyödyntämispaikan sijainti sekä selvitys lähialueen pohjavesialueista ja niiden luokista sekä vedenottopaikoista ja vesistöistä,
- tiedot maarakentamista koskevasta maankäyttö- ja rakennuslain, yleisistä teistä annetun lain tai maantielain mukaisesta suunnitelmasta, ilmoituksesta tai luvasta,
- Lohja Ruduksen yhteyshenkilön nimi ja yhteystiedot,
- jätenimike ja laadunvalvontatiedot materiaalitoimittajalta,
- käytettävän Betoroc-murskeen määrä,
- selvitys Betoroc-mursketta sisältävästä rakenteesta, peittämiseen tai päällystämiseen käytettävästä materiaalista, varastoinnista ja muusta toiminnasta hyödyntämispaikalla sekä näihin liittyvistä tarpeellisista suojaustoimista,
- ajankohta, jolloin hyödyntäminen maarakentamisen aikana alkaa ja päättyy.

5. Rakenteen suunnittelu Betoroc-murskeella

5.1 Päällysrakenne

Betoroc-murskerakenteiden suunnitteluun riittävät samantasoiset lähtötiedot ja korjauskohteissa myös nykytilan tiedot kuin luonnon maa- ja kiviainesrakennetta suunniteltaessa.

Betoroc M1 ja Betoroc M2 soveltuvat kantavaan ja jakavaan kerrokseen tämän ohjeiden mukaisesti rakennettaessa. Betoroc M3 voidaan käyttää jakavassa kerroksessa ja tapauskohtaisesti suunniteltuna kantavassa kerroksessa kohteen olosuhteet, vaatimukset ja muut rakennekerrokset huomioiden. Rakenne-esimerkkejä kaduille ja teille on esitetty kuvissa 2a ja 2b.



Kuva 2. Rakenne-esimerkki katuluokille 1...3 ja päällysrakenneluokille 1...2 (kuva 2a) sekä katuluokille 3...6 ja päällysrakenneluokille 3...6 (kuva 2b). Asfalttibetonipäällystettä (AB) suositellaan käytettäväksi vilkasliikenteisillä pääkaduilla. Betoroc Hk ja Betoroc Sr on oltava routimatonta kuvan 2b käyttötarkoituksessa.

Esimerkkejä kantavuusvaatimusten mukaan mitoitetuista normaalipäällysterakenteista, joissa on käytetty betonimursketta, on esitetty Kuntaliiton ja Tiehallinnon betonimurskeohjeissa.

Betoroc-mursketta käytettäessä voidaan lujittumisesta huolimatta koko päällysrakennetta pitää joustavana päällysrakenteena. Mitoitus tehdään Odemarkin menetelmällä tai analyyttisellä menetelmällä. Ennen rakenteen suunnittelua on selvitettävä vaatimukset Kuntaliiton tai Tiehallinnon betonimurskeohjeista. Odemarkin menetelmässä on em. ohjeissa betonimurskeen E-moduulina käytetty Betoroc M1: 700 MPa ja Betoroc M2: 500 MPa. Ko. moduulien käyttäminen edellyttää betonimurskerakenteen huolellista ohjeiden mukaista rakentamista.

Betoroc-murskeen kerrospaksuudeksi suositellaan vähintään 0,15 m. Betoroc-murskeen lujittumisominaisuutta hyödynnettäessä tulee kerrospaksuuden olla vähintään 0,20 m laattavaikutuksen varmistamiseksi.

Jos Betoroc-mursketta käytetään suolattavilla tie- ja katualueilla, on rakenne suojattava tiiviillä (tyhjätila $< 3 \%$) ja vähintään 70 mm paksulla asfalttibetonikerroksella (vedenläpäisevyys $< 10^{-9}$ m/s) sekä käytettävä riittäviä kallistuksia. Mikäli kulutuskerroksena käytetään SMA-päällystettä, riittää asfalttikerroksen paksuudeksi 50 mm. Päällyste ei myöskään saa olla halkeillut.

Koska Betoroc-murskeen vedenläpäisevyys on pienempi kuin sora- ja kalliomurskeella, tulee Betoroc-murskepinnan sivukallistuksen olla $\geq 3 \%$ (myös tien painumisen jälkeen).

Routamitoitus katurakenteille, joissa on käytetty Betoroc-mursketta, tehdään InfraRYL:n mukaisesti kuten luonnon maa- ja kiviaineksia käytettäessä.

5.2 Alusrakenne, täyttötöyt ja putkikaivannot

Alusrakenne, täyttötöyt ja putkikaivannot suunnitellaan tätä ohjetta soveltaen.

6. Betoroc-murskeen tilaaminen ja saatavuus

Lisätietoja Betoroc-murskeiden ominaisuuksista sekä suunnittelu- ja työohjeita samoin kuin Betoroc-murskeiden tarjoukset (vuosisopimukset ja erilliset tarjoukset), toimitukset ja saatavuuden saa Lohja Ruduksen henkilökunnalta. Lohja Rudus tarjoaa myös Betoroc-murskeiden käyttöön ja suunnitteluun liittyvää teknistä neuvontaa.

Betoroc-mursketta myydään eri puolella maata sopimuksen mukaan. Betoroc-murskeen varastotilanne vaihtelee ajallisesti huomattavasti vastaanotettavan raaka-aineen määrän vaihtelun takia. Tilaaminen ja reaaliaikainen murskeiden saatavuus paikkakunnittain selviää Lohja Ruduksen yhteyshenkilöiltä:

Tuotepäällikkö	Tuomo Joutsenoja
puh.	020 447 7274, 0400 929 149
email	tuomo.joutsenoja@lohjarudus.fi

Toimitukset pääkaupunkiseutu

Aluepäällikkö	Petri Ilama
puh.	020 447 7531, 040 725 4435
email	petri.ilama@lohjarudus.fi

Toimitukset muu maa

Tuotantopäällikkö	Juha Ajanko
puh.	020 447 7267, 040 836 3336
email	juha.ajanko@lohjarudus.fi

BETONIMURSKEREFERENSSEJÄ

Suuria kohteita (≥ 5000 t)

Kohde	Kunta	Rakentaja	Vuosi	Määrä [t]
Maantie 152	Sipoo	Uudenmaan tiepiiri	1994	8000
Paikallistie 11591	Tuusula	Uudenmaan tiepiiri	1995	12000
Valtatie 4	Mäntsälä	Skanska-Tekra Oy	1998	20000
Muonamiehentie 11	Helsinki	Teollisuusrak. Vahtero Oy	1998	6000
Karanojatie	HML	Hämeenlinnan kaupunki	1999	7000
Are Oy:n toimitalo	Vantaa	Jokioisten maarakennus	2000	20000
Liljeholmskajen	Tukholma	JM Ab	2001-2	35000
Electroluxin aluerak.	Tukholma	JM Ab	2002	30000
ABC liikennealueet	Liminka	Pyrisco Oy	2002-3	20000
Niinisaarentie	Helsinki	YIT Infra Oy	2003	35000
Metsälinnuntie	Tuusula	Vesihaka Oy	2003	10000
YTV:n Sorttiasema	Helsinki	Maanperustus Saarinen	2003	20000
VVO:n kohteet Matinkylä	Espoo	NHP Yhtymä Oy	2003	15000
Lidl Oy	Vantaa	Louhintahiekka Oy	2003	12000
Vantaankosken kl-väylä	Vantaa	Niska & Nyyssönen Oy	2003	8000
L&T:n terminaali	Oulu	Oulun maa- ja vesirak.	2004	25000
Kauppakeskukset	Uusimaa	Louhintahiekka Oy	2004	12000
Lidl	Klaukkala	Skanska Tekra Oy	2004	6000
Sundsberg aluerakent.	Kirkkonum	Hyvinkään Tieluiska Oy	2004	28000
Söderkulla aluerakent.	Sipoo	Petokaivin Oy	2004	14000
Kauppakeskuksen pohja	Vantaa	Jokioisten maanrakennus	2004	7000
Pakkalan aluerakentam.	Vantaa	Louhintahiekka	2004	7000
Korson aluerakentaminen	Vantaa	Petokaivin	2004	6000
Kivikko kenttärakenteet	Helsinki	HKR	2004	9000
Olarin kenttärakenteet	Espoo	Louhintahiekka	2004	5000
Esport Arena	Espoo	Esport Arena	2004	5000
Kenttärakenne	Lahti	Päijät-Hämeen jätehuolto	2004	30000
L&T:n terminaali	Oulu	Oulun maa- ja vesirak.	2005	15000
Kenttärakenteet	Vantaa	Skanska Tekra Oy	2005	6000+
Tulkintie	Vantaa	Jokioisten Maanrakennus	2005	27000
Viilarintie	Helsinki	Niska & Nyyssönen	2005	46000
Amiraalintie	Sipoo	Petokaivin Oy	2005	11000
L&T:n terminaali	Oulu	Oulun maa- ja vesirak.	2005	15000
Kenttärakenne, Kujala	Lahti	Päijät-Hämeen jätehuolto	2005	15000
Kenttärakenne	Jyväskylä	Mustankorkea Oy	2005	10000

Kenttärakenne	Kaarina	Kaarinan Kaupunki	2005	9000
Kenttärakenne	Hyvinkää	Kiertokapula Oy	2005	14000
Retailpark	Kuopio	Skansa Talonrakennus	2006	20000
Katurakenteet, Lintuvaara	Espoo	YIT Rakennus Oy	2006	10000
Otaniementie	Espoo	YIT Rakennus Oy	2006	17000
Yrittäjätie	Klaukkala	Majatie KY	2006	16000
Kaatopaikka	Porvoo	Petokaivin Oy	2006	14000
Nikunpelto	Espoo	Suomen Maanrakennus	2006	5000
Kenttärakenne, Kujala	Lahti	Päijät-Hämeen jätehuolto	2006	11000
Kenttärakenne	Jyväskylä	Mustankorkea Oy	2006	13000
Rälssitie	Vantaa	Petokaivin Oy	2006-7	10000
Nuijalantie	Espoo	H&P Infra Oy	2006-7	80000
Nikunmäki	Espoo	Hyvinkään Tieluiska	2006-7	18000
Itäniityntie	Raisio	Raision Kaupunki	2007	6000 +

BETONIMURSKEREFERENSSEJÄ

Kohdelista (suuria ja pieniä kohteita)

Kohde	Kunta	Rakentaja	Vuosi	Määrä [t]
Maantie 152	Sipoo	Uudenmaan tiepiiri	1994	8000
Paikallistie 11591	Tuusula	Uudenmaan tiepiiri	1995	12000
Valtatie 3 levennys	Ylöjärvi	Kesälahden maansiirto	1996	4000
Lahdenperäncatu	Tampere	Tampereen kaupunki	1996	2000
Kuusipolku	Helsinki	Helsingin kaupunki	1996	
Uimahallin P-alue	Raisio	Raision kaupunki	1996	
Pallokenttä	Helsinki	Helsingin kaupunki	1997	3000
Valtatie 4	Mäntsälä	Skanska-Tekra Oy	1998	20000
Tampereen keskustori	Tampere	Tampereen kaupunki	1998	
Kuusimäentie	Tampere	Tampereen kaupunki	1998	
Leppävaarantie	Espoo	Espoon kaupunki	1998	3000
Tilanhoidajankaari	Helsinki	Helsingin kaupunki	1998	3000
Ansatie 4	Vantaa	E.M. Pekkinen Oy	1998	4000
Muonamiehentie 11	Helsinki	Teollisuusrak. Vahtero Oy	1998	6000
Lautasenkatu	Tampere	Tampereen kaupunki	1999	
Karanojatie	HML	Hämeenlinnan kaupunki	1999	7000
Ansatie	Vantaa	E.M. Pekkinen Oy	1999	
Partolan tiejärjestelyt	Pirkkala	Tieliikelaitos	1999	5000
Kompostointikettä	Lahti	Päijät-Hämeen jätehuolto	1999	
Metsä-Sairilan tieverkko	Mikkeli	Mikkelin kaupunki	1999	3000
Rekkatermin. kenttä	HML	Helsingin Talosiirto Oy	1999	
Tampereen keskustori	Tampere	Tampereen kaupunki	1999	
Varastokenttä	Jyväskylä	Mustankorkea Oy	1999	

Överby	Espoo	Aksola & Hannonen Oy	1999	
Strömbergin aukio	Helsinki	E.M. Pekkinen Oy	1999	
Muonamiehentie	Helsinki	Kumuko Oy	1999	
Tilanhoitajankaari	Helsinki	Helsingin kaupunki	1999	
Kevätkatu	Helsinki	Helsingin kaupunki	1999	
Mahlakuja	Helsinki	Helsingin kaupunki	1999	
Norkkokuja	Helsinki	Helsingin kaupunki	1999	
Nuppukuja	Helsinki	Helsingin kaupunki	1999	
Versokuja	Helsinki	Helsingin kaupunki	1999	
Järvenperän koulu	Espoo	Laatutyö Oy	1999	
Pasuunatie	Helsinki	JL-Rakentajat Oy	1999	
Karhuntassuntie	Kerava	Keravan kaupunki	1999	
Elielin aukio	Helsinki	Skanska Tekra Oy	1999	
Voimalantie	Vantaa	YIT-Yhtymä Oy	1999	
Siriuksentie	Vantaa	Rkl Henry Kataja Oy	1999	
Pasuunatie	Helsinki	Rkl Henry Kataja Oy	1999	
Varastokenttä	Oulu	Säkkiväline Oy	1999	
Sudenkatu	Tampere	Tampereen kaupunki	1999	
Lentokonetehtaan tie	Tampere	Tampereen kaupunki	1999	
Leppästensuonkatu	Tampere	Tampereen kaupunki	1999	
Arvionkatu	Tampere	Tampereen kaupunki	1999	
<hr/>				
Are Oy:n toimitalo	Vantaa	Jokioisten maarakennus	2000	20000
Tilanhoitajakaari	Helsinki	Niska & Nyssönen Oy	2000	
Karanojantie	HML	Hämeenlinnan kaupunki	2000	
Strömberginaukio	Helsinki	E.M. Pekkinen Oy	2000	
Uusimäki 19	Espoo	TM-Päällyste ja maanr.	2000	
Köyhämäentie	Vantaa	NHP Yhtymä Oy	2000	
Hallainvuorentie	Helsinki	Rak.liike Reponen Oy	2000	
Postitorvenkatu	Tampere	Tampereen kaupunki	2000	
Riitaniityntie	Pirkkala	Pirkkalan kunta	2000	
<hr/>				
Marjakanvalkama	Helsinki	Rak. Oy Lemminkäinen	2001	
Vuotie	Helsinki	Tieliikelaitos	2001	
Koivu-Mankkaantie	Espoo	E.M. Pekkinen Oy	2001	
Kallioistenkatu	Tampere	Tampereen kaupunki	2001	
Knaapilantie	Tuusula	Tuusulan kunta	2001	
Ruotsintie	Vantaa	NHP-Yhtymä Oy	2001	
P-alue Maxi Leppävaara	Espoo	E.M. Pekkinen Oy	2001	
Liljeholmskajen	Tukholma	JM Ab	2001-2	35000
Marianiemenramppi	Helsinki	Hyvinkään Tieluiska Oy	2001	
Katurakenteet, Toivala	Siilinjärvi	Siilinjärven kunta	2001	
<hr/>				
Kehä I	Helsinki	Tieliikelaitos	2002	
Pakkalan aluerak.	Helsinki	NHP Yhtymä Oy	2002	
Electroluxin aluerak.	Tukholma	JM Ab	2002	30000
Vuotie	Helsinki	Helsingin kaupunki	2002	
Keskustan liik.järjest.	Raisio	Siirtomurske Oy	2002	
Heinjoen moottorirata	Kuopio	Leskisen maanrakennus	2002	
Leppävaaran liik-järjest.	Espoo	Kesälahden Maansiirto Oy	2002	
ABC liikennealueet	Liminka	Pyrisco Oy	2002-3	20000
<hr/>				
Niinisaarentie	Helsinki	YIT Infra Oy	2003	35000

Metsälinnuntie	Tuusula	Vesihaka Oy	2003	10000
YTV:n Sorttiasema	Helsinki	Maanperustus Saarinen	2003	20000
VVO:n kohteet Matinkylä	Espoo	NHP Yhtymä Oy	2003	15000
Lidl Oy	Vantaa	Louhintahiekka Oy	2003	12000
Vantaankosken kl-väylä	Vantaa	Niska & Nyyssönen Oy	2003	8000
Falkkulantie	Helsinki	NHP Yhtymä Oy	2003	10000
Viikinkaari	Helsinki	E.M. Pekkinen Oy	2003	3400
Hiidentie	Helsinki	Petokaivin Oy	2003	
Tammisto	Vantaa	E.M. Pekkinen Oy	2003	
L&T:n terminaali	Oulu	Oulun maa- ja vesirak.	2004	25000
Kauppakeskukset	Uusimaa	Louhintahiekka Oy	2004	12000
Lidl	Klaukkala	Skanska Tekra Oy	2004	6000
Sundsberg aluerakent.	Kirkkonum	Hyvinkään Tieluiska Oy	2004	28000
Söderkulla aluerakent.	Sipoo	Petokaivin Oy	2004	14000
Rekola kunnalistekn.	Vantaa	Petokaivin Oy	2004	4000
Kauppakeskuksen pohja	Vantaa	Jokioisten maanrakennus	2004	7000
Pakkalan aluerakentam.	Vantaa	Louhintahiekka	2004	7000
Korson aluerakentaminen	Vantaa	Petokaivin	2004	6000
Kivikko kenttärakenteet	Helsinki	HKR	2004	9000
Olarin kenttärakenteet	Espoo	Louhintahiekka	2004	5000
Kenttärakenteet	Espoo	Viherrengas Oy	2004	3000
Kauppakeskus pohjat	Järvenpää	Petokaivin Oy	2004	4000
Esport Arena	Espoo	Esport Arena	2004	5000
Kenttärakenne	Lahti	Päijät-Hämeen jätehuolto	2004	30000
L&T:n terminaali	Oulu	Oulun maa- ja vesirak.	2005	15000
Kunnallistekniikka	Espoo	Vihdin kaivuutyö	2005	3000 +
Sekalaiset työt	Vantaa	Maalinja	2005	2000 +
Tietyöt	Espoo	Suomen maansiirto	2005	2000 +
Kenttärakenteet	Vantaa	Skanska Tekra Oy	2005	6000 +
Itäväylän liittymät	Helsinki	Niska & Nyyssönen	2005	2000 +
Kenttärakenteet	Kerava	Jokioisten maanrak.	2005	2000 +
Tulkintie	Vantaa	Jokioisten Maanrakennus	2005	27000
Amiraalintie	Sipoo	Petokaivin Oy	2005	11000
Kenttärakenne, Kujala	Lahti	Päijät-Hämeen jätehuolto	2005	15000
Kenttärakenne	Jyväskylä	Mustankorkea Oy	2005	10000
Kenttärakenne	Kaarina	Kaarinan Kaupunki	2005	9000
Kenttärakenne	Hyvinkää	Kiertokapula Oy	2005	14000
Sairaalan parkkialue	Kuopio	Maanrakennus Keskinen	2006	2000 +
Retailpark	Kuopio	Skansa Talonrakennus	2006	20000
Katurakenteet, Lintuvaara	Espoo	YIT Rakennus Oy	2006	10000
Hakamäentie	Helsinki	YIT Rakennus Oy	2006	
Otaniementie	Espoo	YIT Rakennus Oy	2006	17000
Vaisalantie	Espoo	YIT Rakennus Oy	2006	4000+
Yrittäjätie	Klaukkala	Majatie KY	2006	16000
Katurakenteet, Martinkylä	Sipoo	Majatie KY		2006
Atomitie	Vantaa	Jokioisten Maanrakennus	2006	3000
Tiilitie	Helsinki	Jokioisten Maanrakennus	2006	3000
Loikkokuja	Vantaa	NHP-Yhtymä Oy	2006	
Kaatopaikka	Porvoo	Petokaivin Oy	2006	14000
Peijaksentie	Vantaa	Petokaivin Oy	2006	

Kiitoradantie	Vantaa	Petokaivin Oy	2006	
Kulovalkeantie	Espoo	Hyvinkään Tieluiska	2006	3000
Nikunpelto	Espoo	Suomen Maanrakennus	2006	5000
Kenttärakenne, Kujala	Lahti	Päijät-Hämeen jätehuolto	2006	11000
Kenttärakenne	Jyväskylä	Mustankorkea Oy	2006	13000
Piha-alue	Raisio	Hiab Oy	2006	
<hr/>				
Nikunmäki	Espoo	Hyvinkään Tieluiska	2006-7	18000
Rälssitie	Vantaa	Petokaivin Oy	2006-7	10000
Nuijalantie	Espoo	H&P Infra Oy	2006-7	80000
<hr/>				
Itäniityntie	Raisio	Raision Kaupunki	2007	6000 +
<hr/>				

Valtioneuvoston asetus eräiden jätteiden hyödyntämisestä maarakentamisessa

Annettu Helsingissä 28 päivänä kesäkuuta 2006

Valtioneuvoston päätöksen mukaisesti, joka on tehty ympäristöministeriön esittelystä, säädetään 4 päivänä helmikuuta 2000 annetun ympäristönsuojelulain (86/2000) 12 §:n 4 kohdan ja 30 §:n 1 momentin sekä 3 päivänä joulukuuta 1993 annetun jätelain (1072/1993) 18 §:n 1 momentin 1—3 ja 6 kohdan ja 2 momentin nojalla:

1 §

Tarkoitus

Tämän asetuksen tarkoituksena on edistää jätteiden hyödyntämistä määrittelemällä edellytykset, joiden täyttyessä asetuksessa tarkoitettujen jätteiden käyttöön maarakentamisessa ei tarvita ympäristönsuojelulain (86/2000) mukaista ympäristölupaa.

2 §

Soveltamisala

Tätä asetusta sovelletaan liitteessä 1A tarkoitettujen jätteiden laitos- tai ammatillaiseen hyödyntämiseen seuraavissa maarakentamiskohteissa:

- 1) yleiset tiet, kadut, pyörätiet ja jalkakäytävät sekä niihin välittömästi liittyvät tienpitoa tai liikennettä varten tarpeelliset alueet, pois lukien meluesteet;
- 2) pysäköintialueet;
- 3) urheilukentät sekä virkistys- ja urheilualueiden reitit;
- 4) ratapihat sekä teollisuus-, jätteenkäsittely- ja lentoliikenteen alueiden varastointikentät ja tiet.

Asetusta sovelletaan 1 momentissa tarkoitettuun maarakentamiseen vain, jos se toteutetaan maankäyttö- ja rakennuslaissa (132/1999) tarkoitetun katusuunnitelman, yleisen alueen toteuttamissuunnitelman, luvan tai ilmoituksen

mukaisesti taikka yleisistä teistä annettussa laissa (243/1954) tai maantielaissa (503/2005) tarkoitetun tiesuunnitelman mukaisesti.

Asetusta ei sovelleta tärkeillä tai muilla vedenhankintaan soveltuvilla pohjavesialueilla.

3 §

Määritelmät

Tässä asetuksessa tarkoitetaan:

- 1) hyödyntämispaikan haltijalla luonnollista henkilöä tai oikeushenkilöä, joka hallitse omistus- tai vuokraoikeuden

perusteella paikkaa, jossa jätettä hyödynnetään maarakentamisessa;

- 2) peittämisellä jätettä sisältävän rakenteen suojaamista jätteen leviämisen estämiseksi vähintään 10 cm paksuisella kerroksella luonnon kiviainesta;

- 3) päällystämällä jätettä sisältävän rakenteen suojaamista sadeveden suoutumisen vähentämiseksi asfaltilla, jonka tyhjätila on enintään 5 prosenttia, tai muulla materiaalilla, jolla saavutetaan vastaava suojaustaso.

4 §

Poikkeus ympäristöluvanvaraisuudesta

Jätteen saa hyödyntää ilman ympäristönsuojelulain 28 §:n 2 momentin 4

kohdassa tarkoitettua ympäristölupaa, jos jätteen laadunhallinta ja hyödyntäminen järjestetään ja toiminnasta ilmoitetaan ympäristönsuojelun tietojärjestelmään merkitsemistä varten tämän asetuksen mukaisesti.

5 §

Jätteen hyödyntämistä koskevat vaatimukset

Jätteen hyödyntämisessä on sen lisäksi, mitä ympäristönsuojelulaissa ja jätelaissa (1072/1993) sekä niiden nojalla säädetään, huolehdittava siitä, että:

1) jätteen haitallisten aineiden pitoisuus ja liukoisuus määritettynä liitteen 2A mukaisesti eivät ylitä liitteessä 1A säädettyjä raja-arvoja eikä jäte sisällä epäpuhtauksina muitakaan haitallisia aineita siten, että sen hyödyntämisestä voi aiheutua vaaraa tai haittaa terveydelle tai ympäristölle;

2) sekoitettaessa teknisten ominaisuuksien parantamiseksi liitteessä tarkoitettuja jätteitä keskenään tai lisättäessä jätteeseen kalkkia, sementtiä tai vastaavia sideaineita haitallisten aineiden liukeneminen ja muut ympäristölle tai terveydelle haitalliset päästöt jätteestä eivät sekoittamisen seurauksena lisäänty;

3) käytetään vain maarakenteen tasauksen, kantavuuden ja kestävyyskannalta tarpeellinen määrä jätettä kuitenkin niin, että jätettä sisältävän rakenteen paksuus on enintään 150 cm;

4) jätettä sisältävä rakenne ei joudu kosketuksiin vesilain (264/1961) 1 luvun 4 §:ssä tarkoitetun pohjaveden kanssa;

5) jätettä sisältävän rakenteen etäisyys talousvesikäyttöön tarkoitetusta kaivosta tai lähteestä on vähintään 30 m;

6) jätettä sisältävä rakenne peitetään tai päällystetään;

7) jätteen väliaikainen varastointi ja muu toiminta hyödyntämispaikalla järjestetään siten, että jätteen joutuminen ympäristöön estyy eikä toiminnasta aiheudu muutakaan vaaraa tai haittaa terveydelle tai ympäristölle;

8) jätteen varastointi hyödyntämispaikalla aloitetaan aikaisintaan neljä viikkoa tai, jos jäte varastoidaan suojattuna, kymmenen kuukautta ennen hyödyntämistä.

6 §

Ilmoitus ympäristönsuojelun tietojärjestelmään

Hyödyntämispaikan haltijan on tehtävä ympäristönsuojelulain 65 §:n 1 momentissa tarkoitettu ilmoitus alueelliselle ympäristökeskukselle toiminnan merkitsemiseksi ympäristönsuojelun tietojärjestelmään. Ilmoituksessa on oltava:

1) hyödyntämispaikan haltijan nimi ja yhteystiedot;

2) tiedot hyödyntämispaikan sijainnista sekä sen läheisyydessä sijaitsevista pohjavesialueista ja niiden luokista sekä vedenottoaikoista ja vesistöistä;

3) tiedot maarakentamista koskevasta maankäyttö- ja rakennuslain, yleisistä teistä annetun lain tai maantielain mukaisesta suunnitelmasta, ilmoituksesta tai luvasta;

4) jätteen luovuttajan nimi ja yhteystiedot;

5) jätteen nimike ja selvitys siitä, että liitteessä 1A säädetty raja-arvot alittuvat;

6) jätteen määrä;

7) selvitys jätettä sisältävästä rakenteesta, peittämisestä tai päällystämisestä käytettävästä materiaalista, varastoinnista ja muusta toiminnasta hyödyntämispaikalla sekä näihin liittyvistä tarpeellisista suojaustoimista;

8) ajankohta, jolloin hyödyntäminen maarakentamisen aikana alkaa ja päättyy.

7 §

Jätteen luovuttaminen ja hyödyntämisen aloittaminen

Jätelain 15 §:n 1 momentin 3 kohdan mukaan jätteen saa luovuttaa hyödyntämispaikan haltijalle, kun toiminta on merkitty ympäristönsuojelun tietojärjestelmään.

8 §

Valvonta

Tässä asetuksessa tarkoitetun toiminnan valvontaviranomaisia ovat alueellinen ympäristökeskus ja kunnan ympäristönsuojeluviranomainen.

Alueellisen ympäristökeskuksen on viivytyksettä tarkastettava ympäristönsuojelun tietojärjestelmään merkitsemistä varten tehty ilmoitus ja lähetettävä tieto merkitsemisestä hyödyntämispaikan

haltijalle, jätteen luovuttajalle ja kunnan ympäristönsuojeluviranomaiselle.

Valvontaviranomainen voi ympäristönsuojelulain 13 luvun säännösten nojalla kieltää jätteen hyödyntämisen, jos ilmoitettu toiminta ei täytä jätelaissa tai ympäristönsuojelulaissa taikka niiden nojalla säädettyjä vaatimuksia tai jos hyödyntäminen aloitetaan ennen toiminnan merkitsemistä ympäristönsuojelun tietojärjestelmään.

9 §

Voimaantulo

Tämä asetus tulee voimaan 15 päivänä heinäkuuta 2006.

Ennen tämän asetuksen voimaantuloa voidaan ryhtyä sen täytäntöönpanon edellyttämiin toimiin.

Helsingissä 28 päivänä kesäkuuta 2006

Ministeri Hannes Manninen

Neuvotteleva virkamies Klaus Pfister

ASETUksen SOVELTAMISALAAN KUULUVAT JÄTTEET

Tässä liitteessä määritellään asetuksen soveltamisalaan kuuluvat jätteet sekä niiden sisältämien haitallisten aineiden pitoisuuden ja liukoisuuden raja-arvot.

1. Betonimurske (jätenimikkeet 10 13 14, 17 01 01 ja 19 12 12)

Betonimurskeella tarkoitetaan jätettä, joka on valmistettu puretuista betonirakenteista tai uudisrakentamisen ja betoniteollisuuden betonijätteistä murskaamalla enintään 150 millimetrin kappalekokoon.

Haitallinen aine	Raja-arvo, mg/kg kuiva-ainetta Perustutkimukset ¹			Raja-arvo, mg/kg kuiva-ainetta Laadunvalvontatutkimukset ¹		
	Pitoisuus	Liukoisuus (L/S = 10 l/kg) Peitetty rakenne	Liukoisuus (L/S = 10 l/kg) Päällystetty rakenne	Pitoisuus	Liukoisuus (L/S = 10 l/kg) Peitetty rakenne	Liukoisuus (L/S = 10 l/kg) Päällystetty rakenne
PCB ²	1,0			1,0		
PAH ³	20					
TOC ⁴	30 000					
DOC ⁵		500	500			
Antimoni (Sb)		0,06	0,06			
Arseeni (As)	50	0,5	0,5	50		
Barium (Ba)		20	20			
Kadmium (Cd)	10	0,02	0,02	10	0,02	0,02
Kromi (Cr)	400	0,5	0,5	400	0,5	0,5
Kupari (Cu)	400	2,0	2,0	400	2,0	2,0
Elohopea (Hg)		0,01	0,01			
Lyijy (Pb)	300	0,5	0,5	300	0,5	0,5
Molybdeeni (Mo)		0,5	0,5			
Nikkeli (Ni)		0,4	0,4			
Vanadiini (V)		2,0	2,0			
Sinkki (Zn)	700	4,0	4,0	700		
Seleen (Se)		0,1	0,1			
Fluoridi (F ⁻)		10	10			
Sulfaatti (SO ₄ ²⁻)		1 000	3 000		1 000	3 000
Kloridi (Cl)		800	800			

¹ Katso liitteessä 2A oleva 2 kohta.

² Polyklooratut bifenyylit, kongeneerien 28, 52, 101, 118, 138, 153 ja 180 kokonaismäärä.

³ Polyaromaattiset hiilivedyt, yhdisteiden (antraseeni, asenafteni, asenaftyleeni, bentso(a)antraseeni, bentso(a)pyreeni, bentso(b)fluoranteeni, bentso(g,h,i)perylenei, bentso(k)fluoranteeni, dibentso(a,h)antraseeni, fenantreeni, fluoranteeni, fluoreeni, indeno(1,2,3-cd)pyreeni, naftaleeni, pyreeni, kryseeni) kokonaismäärä.

⁴ Orgaanisen hiilen kokonaismäärä.

⁵ Liennut orgaaninen hiili.

¹ Yleisempien jätteiden sekä ongelmajätteiden luettelosta annetun ympäristöministeriön asetuksen (1129/2001) mukainen jättenimike.

2. Kivihiilen, turpeen ja puuperäisen aineksen polton lentotuhkat (jätenimikkeet1 10 01 02, 10 01 03 ja 10 01 17) ja pohjatuhkat (jätenimikkeet1 10 01 01, 10 01 15)

Kivihiilen polton lento- ja pohjatuhkalla tarkoitetaan jätettä, joka on eroteltu kivihiilen poltossa syntyvistä savukaasuista mekaanisesti tai sähköisesti tai joka on poistettu kivihiilen polttolaitoksen polttokammion pohjalta.

Turpeen ja puuperäisen aineksen polton lento- ja pohjatuhkalla tarkoitetaan jätettä, joka on eroteltu mekaanisesti tai sähköisesti turpeen, puuhakkeen, kuorijätteen, ensiömassan tuotannon tai massasta valmistettavan paperin tuotannon yhteydessä syntyvän kuituainetta sisältävän kasviperäisen jätteen, käsittelemättömän puujätteen tai muun näihin rinnastettavan puuperäisen aineksen taikka niiden seoksen poltossa syntyvistä savukaasuista tai poistettu polttolaitoksen polttokammion pohjalta.

Haitallinen aine	Raja-arvo, mg/kg kuiva-ainetta			Raja-arvo, mg/kg kuiva-ainetta		
	Perustutkimukset ¹			Laadunvalvontatutkimukset ¹		
	Pitoisuus	Liukoisuus (L/S = 10 l/kg) Peitetty rakenne	Liukoisuus (L/S = 10 l/kg) Päälystetty rakenne	Pitoisuus	Liukoisuus (L/S = 10 l/kg) Peitetty rakenne	Liukoisuus (L/S = 10 l/kg) Päälystetty rakenne
PCB ²	1,0					
PAH ³	20/40 ⁴					
DOC ⁵		500	500			
Antimoni (Sb)		0,06	0,18			
Arseeni (As)	50	0,5	1,5	50		
Barium (Ba)	3 000	20	60	3 000		
Kadmium (Cd)	15	0,04	0,04	15		
Kromi (Cr)	400	0,5	3,0	400	0,5	3,0
Kupari (Cu)	400	2,0	6,0	400		
Elohopea (Hg)		0,01	0,01			
Lyijy (Pb)	300	0,5	1,5	300	0,5	1,5
Molybdeeni (Mo)	50	0,5	6,0	50	0,5	6,0
Nikkeli (Ni)		0,4	1,2			
Vanadiini (V)	400	2,0	3,0	400	2,0	3,0
Sinkki (Zn)	2 000	4,0	12	2 000		
Seleen (Se)		0,1	0,5		0,1	0,5
Fluoridi (F ⁻)		10	50		10	50
Sulfaatti (SO ₄ ²⁻)		1 000	10 000		1 000	10 000
Kloridi (Cl ⁻)		800	2 400		800	2 400

¹ Katso liitteessä 2A oleva kohta 2.

² Polyklooratut bifenyylit, kongeneerien 28, 52, 101, 118, 138, 153 ja 180 kokonaismäärä.

³ Polyaromaattiset hiilivedyt, yhdisteiden (antraseeni, asenafteneeni, asenaftyleeni, bentso(a)antraseeni, bentso(a)pyreeni, bentso(b)fluoranteeni, bentso(g,h,i)peryleneeni, bentso(k)fluoranteeni, dibentso(a,h)antraseeni, fenantreeni, fluoranteeni, fluoreeni, indeno(1,2,3-cd)pyreeni, naftaleeni, pyreeni, kryseeni) kokonaismäärä.

⁴ Peitetty rakenne/päälystetty rakenne.

⁵ Liuennot orgaaninen hiili.

JÄTTEEN LAADUNHALLINTA

Tässä liitteessä määritellään asetuksen mukaisen hyödyntämisen edellyttämän jätteen laadunhallinnan yleisperiaatteet.

1. Laadunvarmistusjärjestelmä

Jätteen luovuttajalla on oltava laadunvalmistusjärjestelmä, joka sisältää ainakin seuraavat kohdat:

1) laadunvalvontatutkimukset

- näytteenottosuunnitelma ja arvio näytteenoton edustavuudesta sekä ohjeet näytteenotosta, näytteiden valmistuksesta ja näytteiden toimittamisesta analysoitaviksi
- tutkimus- ja määritysmenetelmät, seurattavat haitalliset aineet ja muut seurattavat ominaisuudet sekä seurantatiheydet
- tutkittavien haitallisten aineiden raja-arvot
- laatupoikkeamien käsittely ja hyväksyttävät poikkeamat
- näytteenoton ja tutkimusten laadunvarmistus
- laadunvalvonnan seuranta-asiakirjat ja raportointiohje

2) vastuuhenkilöt ja näiden pätevyys

3) ohjeet jätteen vastaanotosta (erityisesti, jos kysymys on useista kohteista toimitettavan jätteen käsittelystä hyödyntämiskelpoiseksi), varastoinnista, käsittelystä ja toimittamisesta hyödyntämispaikkaan

4) laadunvarmistusjärjestelmän arviointi- tai auditointisuunnitelma

5) tarvittaessa erityiset puhtausvaatimukset, kuten jätteeseen kuulumattoman aineksen osuus

6) seuranta ja raportointi

- laadunvalvontapöytäkirja kultakin näytteenotto- ja tutkimuskerralta
- havaitut laatupoikkeamat ja niiden johdosta tehdyt toimenpiteet
- hyödynnettäväksi toimitettavan jätteen määrä ja laatu sekä toimituskohteet.

2. Tutkimukset

Jätteen laatu on selvitettävä perus- ja laadunvalvontatutkimuksin. Mittaukset, testaukset, selvitykset ja tutkimukset on tehtävä ympäristönsuojelulain 108 §:n mukaisesti pätevästi, luotettavasti ja tarkoituksenmukaisin menetelmin.

Perustutkimuksilla osoitetaan jätteen kuuluvan asetuksen soveltamisalaan. Perustutkimuksissa on vakioiduin analyysi- ja testausmenetelmin selvitettävä ainakin jätteen koostumus ja haitallisten aineiden liukoisuus. Vähintään viiden vuoden väliajoin tai, jos jätet-

tä tuottavassa toiminnassa tapahtuu muutoksia, jotka voivat olennaisesti vaikuttaa jätteen laatuun, on tehtävä riittävät lisätutkimukset sen varmistamiseksi, että jäte edelleen vastaa perustutkimuksia. Samalla on tarkistettava ja tarvittaessa uusittava laadunvarmistusjärjestelmä.

Jätteen laatua on seurattava laadunvalvontatutkimuksin riittävän pitkän ajan laadunvarmistusjärjestelmän mukaisesti. Vähimmäisvaatimuksena pidetään viittä peräkkäistä näytteenottosuunnitelman mukaista tutkimuskertaa. Jos jätteen laatua ei ole seurattu riittävän pitkältä ajalta, voidaan jätteen hyväksyvyyttä asetuksen mukaiseen käyttöön arvioida jäte-erittäin tehtävien perustutkimusten perusteella.

Laadunvalvonnan tuloksissa voidaan hyväksyä enintään 30 prosentin raja-arvon ylitys, jos viimeisten kahden vuoden aikana tehtyjen määritysten keskiarvo ei ylitä asetettua raja-arvoa. Jos jätteestä ei ole käytettävissä laadunvalvonnan tuloksia viimeisten kahden vuoden ajalta, lasketaan keskiarvo laadunvalvonnan kestoajalta, kuitenkin vähintään viideltä peräkkäiseltä tutkimuskerralta.

Näytteenotto on tehtävä 2.1 kohdan ja haitallisten aineiden määritykset 2.2 kohdan mukaisesti. Vastavuoroisen tunnustamisen periaatteen mukaisesti voidaan myös käyttää menetelmiä, jotka perustuvat Euroopan unionin toisessa jäsenvaltiossa, Turkissa tai ETA-sopimuksen osapuolena olevassa EFTA- valtiossa käytettyihin standardeihin tai teknisiin eritelmiin, jotka täyttävät 2.1 ja 2.2 kohdassa tarkoitettujen menetelmien keskeiset vaatimukset.

2.1 Näytteenotto

Näytteenotto ja näytteiden valmistus on tehtävä standardien SFS-EN 932-1 ja SFS-EN 932-2 sekä standardiluonnoksen prEN 14899 mukaisesti. Näytteet on otettava ensisijaisesti jatkuvasta jätevirrasta. Näytteenottajalla tulee olla tehtävän edellyttämä riittävä pätevyys. Standardin ja standardiluonnoksen mukaisista näytteenottovaatimuksista voidaan poiketa, jos niiden mukainen näytteenotto ei jätteen laadun vuoksi ole teknisesti tai taloudellisesti kohtuullisesti toteutettavissa.

2.2 Määritysmenetelmät

Jätteen sisältämien ja siitä liukenevien haitta-aineiden määrityksissä on käytettävä ensisijaisesti standardoituja ja toissijaisesti muita määritysherkkydeltään, tarkkuudeltaan ja toistettavuudeltaan riittäviksi todettuja muita menetelmiä.

Haitallisten aineiden pitoisuus jätteessä:

Näytteen esikäsittelyssä metallien määritystä varten on käytettävä standardin SFS-EN 13656 mukaista happouuttoa ja mikroaaltohajoitusta tai standardin SFS-EN 13657 mukaista aqua regia uuttoa.

Metallien määrityksessä on käytettävä standardoituja menetelmiä (ICP- MS, ICP- AES tai AAS). Niiden sijasta voidaan käyttää muita menetelmiä, jos tulosten vastaavuus mainittujen menetelmien tulosten kanssa tunnetaan.

Orgaanisen hiilen kokonaismäärän (TOC) määrittämisessä on käytettävä standardin SFS-EN 13137 mukaista menetelmää.

Polykloorattujen bifenyyliden (PCB) määrittämisessä on käytettävä standardiluonnoksen prEN 15308 mukaista menetelmää.

Haitallisten aineiden liukoisuus jätteestä:

Haitallisten aineiden liukoisuuden määrittämisessä on käytettävä standardiluonnoksen prCEN/TS 14405 mukaista läpivirtaustestiä. Laadunvalvonnassa voidaan myös käyttää standardin SFS-EN 12457-3 mukaista kaksivaiheista ravistelutestiä.

Haitallisten aineiden pitoisuus uuttoliuoksissa on määritettävä standardien SFS-EN 12506 (pH, As, Ba, Cd, Cl-, Co, Cr, CrVI, Cu, Mo, Ni, NO₂-, Pb, kokonais-S, SO₄²⁻, V ja Zn) ja SFS -EN 13370 (ammonium, AOX, sähkön johtavuus, Hg, fenoli-indeksi, TOC, helposti vapautuva CN- ja F-) mukaisesti.

ILMOITUS JÄTTEEN HYÖDYNTÄMISESTÄ MAARAKENTAMISESSA

(Valtioneuvoston asetus eräiden jätteiden hyödyntämisestä maarakentamisessa 591/2006)

(Viranomaisen täyttää) Diaarimerkintä	Viranomaisen yhteystiedot
Ilmoitus on tullut vireille	

1. HYÖDYNTÄMISPAIKAN HALTIJA

Nimi	Yritys- ja yhteisötunnus
Postiosoite	Postinumero ja -toimipaikka
Yhteyshenkilön nimi ja yhteystiedot (osoite, puhelin, telefax, sähköposti)	

2. HYÖDYNNETTÄVÄN JÄTTEEN LUOVUTTAJAN NIMI JA YHTEYSTIEDOT

Nimi	Yritys- ja yhteisötunnus
Postiosoite	Postinumero ja -toimipaikka
Yhteyshenkilön nimi ja yhteystiedot (osoite, puhelin, telefax, sähköposti)	

3. MAHDOLLINEN VALTUUTUS ILMOITUKSEN TEKEMISEEN HYÖDYNTÄMISPAIKAN HALTIJAN PUOLESTA

Olen saanut valtuuden ilmoituksen tekemiseen hyödyntämispaikan haltijalta <input type="checkbox"/>
Diaarinumero/sopimusnumero/muu tunnistenumero
Pvm

4. ILMOITUKSEN TEKIJÄ, JOS JOKU MUU KUIN HYÖDYNTÄMISPAIKAN HALTIJA

Nimi	Yritys- ja yhteisötunnus
Postiosoite	Postinumero ja -toimipaikka
Yhteyshenkilön nimi ja yhteystiedot (osoite, puhelin, telefax, sähköposti)	

5. TIEDOT HYÖDYNTÄMISPAIKAN SIJAINNISTA

Kunta	Koordinaatti (alueellisesta kohteesta keskipiste) itä: pohj:	Kiinteistörekisterinumero
Osoite	Postinumero ja -toimipaikka	
Tienumero ja tieosa		
Muu tieto	Sijainti on esitetty liitteenä olevassa kartassa <input type="checkbox"/>	

6. MAARAKENTAMISKOHDE/-KOhteet

- ☒ yleinen katu
☐ yleinen tie
☒ kevyen liikenteen väylä
☒ jalkakäytävä
☒ edellä mainitun liitännäisalue
☒ pysäköintialue
☐ urheilukenttä
☒ virkistys- tai urheilualan reitti
☐ ratapiha
☐ varastointikenttä teollisuusalueella
☐ varastointikenttä jätteenkäsittelyalueella
☐ varastointikenttä lentoliikenteen alueella
☐ tie teollisuusalueella
☐ tie jätteenkäsittelyalueella
☐ tie lentoliikenteen alueella

7. LYHIN ETÄISYYS I-LUOKAN POHJAVESIALUEESEEN (MIKÄLI ALLE 200 m)

m

8. LYHIN ETÄISYYS II-LUOKAN POHJAVESIALUEESEEN (MIKÄLI ALLE 200 m)

m

9. TALOUSVESIKÄYTTÖSSÄ OLEVAN KAIVON ETÄISYYS RAKENTEESTAYli 30 m ☐Alle 30 m ☐**10. ETÄISYYS ALLE 200 m ETÄISYYDELLÄ OLEVIIN VESISTÖIHIN**

Järvi m

Joki m

Meri m

Puro m

11. RAKENNUSKOHDEN ON SEURAAVAN MAANKÄYTTÖ- JA RAKENNUSLAIN, MAANTIELAIN TAI YLEISISTÄ TEISTÄ ANNETUN LAIN MUKAISEN SUUNNITELMAN, LUVAN TAI ILMOITUKSEN MUKAINEN

- ☐ katusuunnitelma tunnistetieto
☐ tiesuunnitelma tunnistetieto
☐ yleisen alueen toteuttamissuunnitelma tunnistetieto
☐ rakennuslupa tunnistetieto
☐ toimenpidelupa tunnistetieto
☐ purkamislupa tunnistetieto
☐ maisematyölupa tai -ilmoitus tunnistetieto
☐ parantamiskohteen rakentamissuunnitelma (jolla aiemmin joku edellä mainituista luvista, suunnitelmista tai ilmoituksesta)

12. HYÖDYNNETTÄVÄN JÄTTEEN NIMI JA MÄÄRÄ

Betonimurske

Jätenimike 10 13 14 tonnia

Jätenimike 17 01 01 tonnia

Jätenimike 19 12 12 tonnia

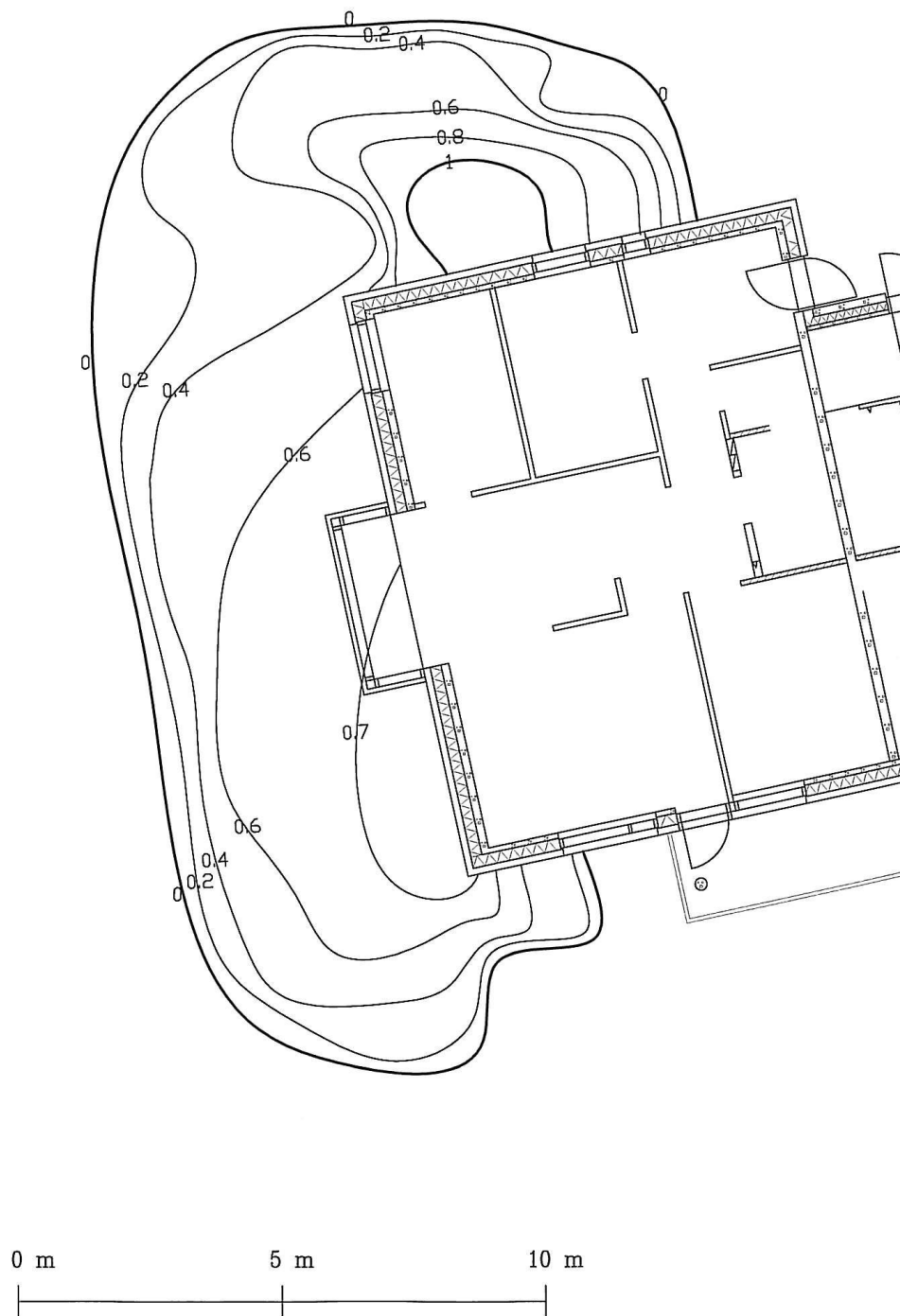
Kivihiilen lentotuhka

Jätenimike 10 01 02 tonnia

Kivihiilen pohjatuhka

Jätenimike 10 01 01 tonnia

Nimen selvennys



Viikin koerakenteet. Koekentän 1 pohjatuhkan kerrospaksuudet.



Viikin koerakenteet. Koekentän 2 pohjatuhkan kerrospaksuudet.

Tilavuuspainon määrittäminen kenttäkokeilla
Kenttäkokeet - 24.8.2006
Viikin tuhkakoekenttä

g= 9,81 m/s²

Sylinterinäytteet		näyttenro.		kosteus näyte (g)	kuiva näyte (g)	tilavuus (mm ³)	γ _m (kN/m ³)	γ _d (kN/m ³)	tiivistyslaitteisto	kerros-
Tuhka		t1	t2	t3	t4	t5	t6			paksuus (m)
Martinlaakson hiilipölytuhka			758,2	1585,6	1684	1624	1637,3	752,68	7,6 työntötäry 450 kg/m ²	1,2
Martinlaakson hiilipölytuhka			1641,6	1585,6	1684	1624	1637,3	1487,32	8,5 työntötäry 450 kg/m ²	0,8
Martinlaakson hiilipölytuhka			1585,6	1585,6	1684	1624	1637,3	1488,9	8,8 työntötäry 450 kg/m ²	0,8
Martinlaakson hiilipölytuhka			1684	1585,6	1684	1624	1637,3	1448,4	9,0 hydrauliilätkä 8000 kg/m ²	1
Martinlaakson hiilipölytuhka			1624	1585,6	1684	1624	1637,3	1441	8,8 hydrauliilätkä 8000 kg/m ²	0,8
Martinlaakson hiilipölytuhka			1637,3	1585,6	1684	1624	1637,3	1499,4	8,7 hydrauliilätkä 8000 kg/m ²	1
								keskiarvo	8,6	
Suomenojan leijupettituhka		tshp1	1482	1416,5	1374,1			1481,3	7,5 hydrauliilätkä 8000 kg/m ²	0,4
Suomenojan leijupettituhka		tshp2	1416,5	1416,5	1374,1			1493,3	6,9 hydrauliilätkä 8000 kg/m ²	0,8
Suomenojan leijupettituhka		tshp3	1374,1	1416,5	1374,1			1390,7	6,9 hydrauliilätkä 8000 kg/m ²	0,4
								keskiarvo	7,1	
Suomenojan leijupettituhka		tlp1	2276	2205,5	2166,3			1440,12	13,2 hydrauliilätkä 8000 kg/m ²	1
Suomenojan leijupettituhka		tlp2	2205,5	2205,5	2166,3			1435,7	13,9 hydrauliilätkä 8000 kg/m ²	1
Suomenojan leijupettituhka		tlp3	2166,3	2205,5	2166,3			1435,5	13,7 hydrauliilätkä 8000 kg/m ²	1,5
								keskiarvo	13,6	

Vesivolymetri		näyttenro.		kosteus näyte (g)	kuiva näyte (g)	tilavuus (mm ³)	γ _m (kN/m ³)	γ _d (kN/m ³)	tiivistyslaitteisto	kerros
Tuhka		vv1	vv2	vv3	vv4	vv5				paksuus (m)
Martinlaakson hiilipölytuhka			1038,4	1159,8	965,6			876	9,2 hydrauliilätkä 8000 kg/m ²	0,6
Martinlaakson hiilipölytuhka			1029	1159,8	965,6			945	8,5 hydrauliilätkä 8000 kg/m ²	0,6
Martinlaakson hiilipölytuhka			1159,8	1159,8	965,6			934	10,1 hydrauliilätkä 8000 kg/m ²	1,1
Martinlaakson hiilipölytuhka			965,6	1159,8	965,6			898	8,4 hydrauliilätkä 8000 kg/m ²	0,9
Martinlaakson hiilipölytuhka			978,7	1159,8	965,6			895	8,8 hydrauliilätkä 8000 kg/m ²	0,9
								keskiarvo	9,0	

Lohja Rudus (ICT)		Helsingin Energia	
Vertailuarvoja:	γ _m (kN/m ³)	γ _d (kN/m ³)	suunnitteluarvo
Mart. hiilipölytuhka	13,4	11,5	16
Suo. hiilipölytuhka	12,2	9,3	16
Suo. leijupettituhka	17,7	15,3	-

Heavy loadman pudotuspainokokeiden tulokset
Tuhakokekenttä Viikki - 82113199
24.8.2006 - MHK

koekenttä	nro	E1 [MN/m ²]	E2 [MN/m ²]	suhde E2/E1	levykuormituskoetta vastaava E2 [MN/m ²]
Martinlaakson hiilipölytuhka	8	81	89	1,10	77
Martinlaakson hiilipölytuhka	9	76	84	1,11	73
Martinlaakson hiilipölytuhka	10	78	84	1,08	73
Suomenojan hiilipölytuhka	4	79	85	1,08	74
Suomenojan hiilipölytuhka	5	80	92	1,15	80
Suomenojan hiilipölytuhka	6	78	92	1,18	80
Suomenojan hiilipölytuhka	7	84	93	1,11	81
Suomenojan leijupetituhka	1	81	88	1,09	77
Suomenojan leijupetituhka	2	80	89	1,11	77
Suomenojan leijupetituhka	3	81	86	1,06	75

koekenttä	nro	kerrospaksuus [m]	pohjamaan laatu (alta ylös)	pohjamaan kantavuus [MPa]	tiivistyskertojen lkm. (hydrauliitytin)	pohjatuhkan E-moduuli [MPa]
Martinlaakson hiilipölytuhka	8	0,4	savea jonka päällä moreenia (1 m)	55	4-5 (450 kg/m ²)	106
Martinlaakson hiilipölytuhka	9	0,3	savea jonka päällä moreenia (1 m)	55	2-3	110
Martinlaakson hiilipölytuhka	10	0,4	savea jonka päällä mursketta (0,2 m)	21	2-3	90
Suomenojan hiilipölytuhka	4	0,4	moreenitie (1,5 m) ja leijupetituhka (0,2 m)	74	2-3	90
Suomenojan hiilipölytuhka	5	0,8	murske (0,2 m) ja leijupetituhka (1,0 m)	75	2-3	92
Suomenojan hiilipölytuhka	6	0,8	moreenitie (1,2 m)	57	2-3	95
Suomenojan hiilipölytuhka	7	0,6	moreenitie (1,5 m)	59	2-3	100
Suomenojan leijupetituhka	1	1,6	savea jonka päällä mursketta (0,2 m)	21	2-3	88
Suomenojan leijupetituhka	2	1,6	savea jonka päällä mursketta (0,2 m)	21	2-3	89
Suomenojan leijupetituhka	3	0,6	savea jonka päällä mursketta (0,2 m)	21	2-3	91

Pohjamaalle käytetyt E-moduulit:

savi	30 MPa
murske	180 MPa
moreeni	60 MPa

Hyvinkään pohjatuhkakoeöntän kantavuusmittaukset Loadman-laitteella
Yhteenvedotaulukko 11.10.2006
Miikka Hakari

Pohjamaan (jäte) kantavuus	E1 [MPa]	E2 _{ka} [MPa]	E2 _{ka} /E1
Koeöntän 1 ja 2 keskiarvot	10,2	12,0	1,18

Jätetäytön päältä koeöntä 1		jyrätty 3 kertaa			jyrätty 6 kertaa		
koenumero	kerrospaksuus [m]	E1 [MPa]	E2 _{ka} [MPa]	E2 _{ka} /E1	E1 [MPa]	E2 _{ka} [MPa]	E2 _{ka} /E1
1	0,55	17	24,4	1,44	18	27,8	1,54
2	0,45	15	22,3	1,49	23	29,4	1,28
3	0,40	18	24,4	1,36	20	31,2	1,56
4	0,35	18	25,8	1,43	20	29,0	1,45
5	0,65	-	-	-	15	22,8	1,52

Jätetäytön päältä koeöntä 2		jyrätty 3 kertaa			jyrätty 6 kertaa		
koenumero	kerrospaksuus [m]	E1 [MPa]	E2 _{ka} [MPa]	E2 _{ka} /E1	E1 [MPa]	E2 _{ka} [MPa]	E2 _{ka} /E1
1	0,55	30	39,8	1,33	27	38,4	1,42
2	0,45	25	40,8	1,63	27	37,8	1,40
3	0,40	21	34,2	1,63	21	32,8	1,56
4	0,35	21	36,6	1,74	23	35,8	1,56
5	0,65	22	36,8	1,67	23	38,8	1,69

Pohjamaan (BeM) kantavuus	E1 [MPa]	E2 _{ka} [MPa]	E2 _{ka} /E1
Koeöntän 3 keskiarvot	54,0	90,0	1,67

Betonimurskeen päältä koeöntä 3		jyrätty 3 kertaa			jyrätty 6 kertaa		
koenumero	kerrospaksuus [m]	E1 [MPa]	E2 _{ka} [MPa]	E2 _{ka} /E1	E1 [MPa]	E2 _{ka} [MPa]	E2 _{ka} /E1
1	0,1	45	75,2	1,67	29	55,4	1,91
2	0,12	25	37	1,48	24	36,4	1,52
3	0,23	20	33	1,65	26	41,6	1,60
4	0,27	23	37,2	1,62	32	44,6	1,39
5	0,35	18	26,6	1,48	25	33,2	1,33
6	0,47	-	-	-	25	34,0	1,36

Koerakenne Hyvinkää KOEKENTTÄ 1						13.10.2006		(E _{max} = 6 x E _A)	
Kerros	E _A MPa	h m	E MPa	E _{max} MPa	E _Y MPa	Selitys			
Pohjamaa jäte									
Tuhka	8,9	0,20	34	53	16	Tuhka	mitattu E2ka 26,1		
	15,8	0,20	34	95	22				
	22,2	0,15	34	133	26				
Yhteensä =		0,55	m						

Koerakenne Hyvinkää KOEKENTTÄ 1						13.10.2006		(E _{max} = 6 x E _A)	
Kerros	E _A MPa	h m	E MPa	E _{max} MPa	E _y MPa	Selitys			
Pohjamaa jäte									
Tuhka	11	0,20	35	66	18	Tuhka	mitattu E2ka		
	18,2	0,25	35	109	26		25,9		
Yhteensä =		0,45	m						

Koerakenne Hyvinkää KOEKENTTÄ 1						(E _{max} = 6 x E _A)	
Kerros	E _A MPa	h m	E MPa	E _{max} MPa	E _Y MPa	Selitys	
Pohjamaa jäte							
Tuhka	11,8	0,20	41	71	20	Tuhka	mitattu E2ka
	20,2	0,20	41	121	28		27,8
Yhteensä =		0,40	m				

Koerakenne Hyvinkää KOEKENTTÄ 1						13.10.2006 (E _{max} = 6 x E _A)	
Kerros	E _A MPa	h m	E MPa	E _{max} MPa	E _y MPa	Selitys	
Pohjamaa jäte							
Tuhka	14	0,20	40	84	22	Tuhka	mitattu E2ka
	22,1	0,15	40	133	27		27,4
Yhteensä =		0,35	m				

Koerakenne Hyvinkää KOEKENTTÄ 1						13.10.2006	(E _{max} = 6 x E _A)	
Kerros	E _A MPa	h m	E MPa	E _{max} MPa	E _y MPa	Selitys		
Pohjamaa jäte								
Tuhka	8	0,20	28	48	14	Tuhka	mitattu E2ka	
	13,7	0,20	28	82	19		22,8	
	18,9	0,25	28	113	23			
Yhteensä =		0,65	m					

Koekentän 1 keskiarvo E-moduuli 35,6 Mpa

Martinlaakson hiilipölytuhkan E-moduuli 39 Mpa

Koerakenne Hyvinkää KOEKENTTÄ 2				13.10.2006		(E _{max} = 6 x E _A)	
Kerros	E _A MPa	h m	E MPa	E _{max} MPa	E _Y MPa	Selitys	
Pohjamaa jäte							
Tuhka	8,9	0,20	60	53	19		mitattu E2ka 39,1
	19,5	0,20	60	117	32		
	31,7	0,15	60	190	39		
Yhteensä =		0,55	m				

Koerakenne Hyvinkää KOEKENTTÄ 3							(E _{max} = 6 x E _A)	
Kerros	E _A MPa	h m	E MPa	E _{max} MPa	E _y MPa	Selitys		
Pohjamaa betonimurske								
Tuhka	86,4	0,10	30	518	65		mitattu E2ka	
Yhteensä =							0,10	65,3
							m	

Koerakenne Hyvinkää KOEKENTTÄ 3							(E _{max} = 6 x E _A)	
Kerros	E _A MPa	h m	E MPa	E _{max} MPa	E _y MPa	Selitys		
Pohjamaa betonimurske								
Tuhka	95,8	0,12	11	575	37		mitattu E2ka	
Yhteensä =							0,12	36,7
							m	

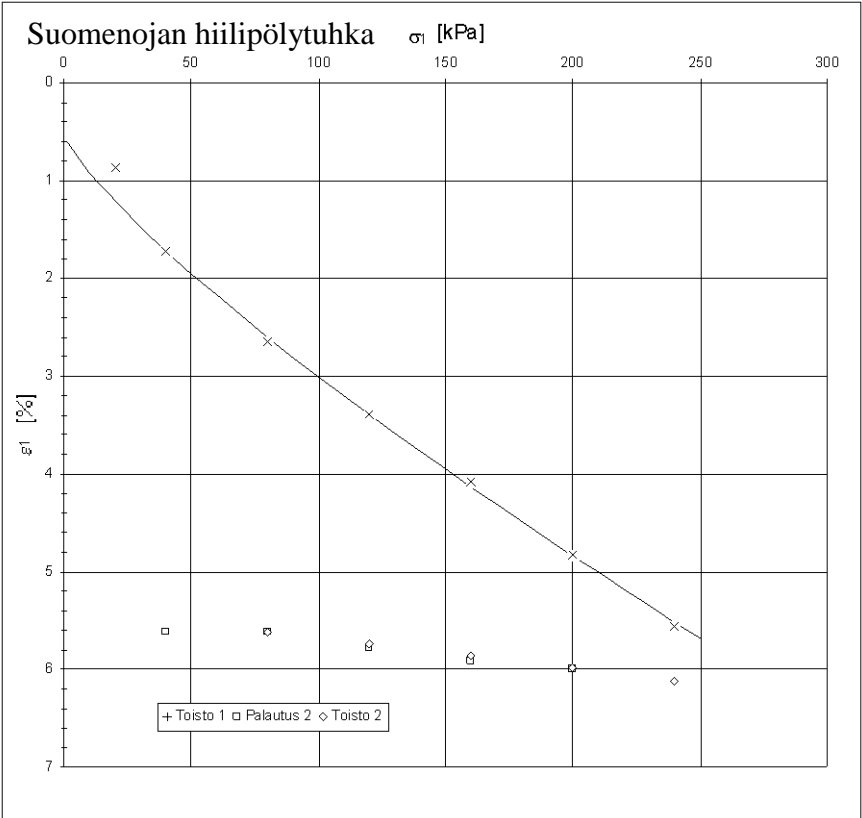
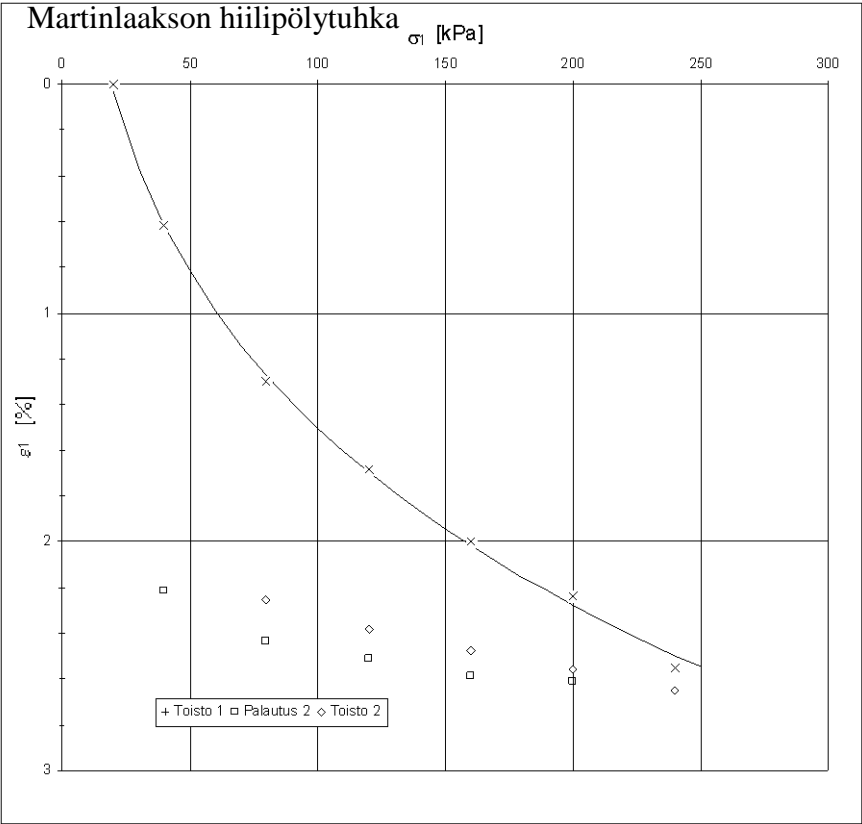
Koerakenne Hyvinkää KOEKENTTÄ 3							(E _{max} = 6 x E _A)	
Kerros	E _A MPa	h m	E MPa	E _{max} MPa	E _y MPa	Selitys		
Pohjamaa betonimurske								
Tuhka	100,2	0,23	21	601	37		mitattu E2ka	
Yhteensä =							0,23	37,3
							m	

Koerakenne Hyvinkää KOEKENTTÄ 3							(E _{max} = 6 x E _A)	
Kerros	E _A MPa	h m	E MPa	E _{max} MPa	E _y MPa	Selitys		
Pohjamaa betonimurske								
Tuhka	100	0,15	24,5	600	52		mitattu E2ka	
Yhteensä =							0,12	40,9
							0,27	
							m	

Koerakenne Hyvinkää KOEKENTTÄ 3							(E _{max} = 6 x E _A)	
Kerros	E _A MPa	h m	E MPa	E _{max} MPa	E _y MPa	Selitys		
Pohjamaa betonimurske								
Tuhka	67,6	0,20	22	406	36		mitattu E2ka	
Yhteensä =							0,15	29,9
							0,35	
							m	

Koekentän 3 keskiarvo E-moduuli 21,7

Martinlaakson hiilipölytuhkan E-moduuli 39 MPa





Kohde/näyte 13806 LR Petri Ilama Pohjatuhkanäytteet

Proctor-sullonnalla määritetyt arvot:				ICT-laitteella valmistetun koekappaleen tiedot:								
Näytetunnus	Näytteen pvm:	Proctor-sullonnan optimi w (%)	Proctor-sullonnan max.kuivatiiv.paino (kN/m ³)	Koekappaleen valmistus pvm:	Koekappaleen korkeus (mm)	Halkaisija (mm)	w (%)	Kappaleen märkäpaino (g)	Kappaleen kuivapaino (g)	Kuivaa ainetta kappaleessa (g/l)	Kappaleen märkätilav. paino (kN/m ³)	ICT kierrokset (kpl)
Martilaakson hiilipölytuhka	24.1.2006	13,00	13,00	22.5.2006	105,0	100,0	15,9	1121,6	967,7	2466	13,34	150
Martilaakson hiilipölytuhka	24.1.2006	13,00	13,00	22.5.2006	105,0	100,0	15,9	1122,1	968,2	2467	13,35	150
Martilaakson hiilipölytuhka	24.1.2006	13,00	13,00	22.5.2006	105,0	100,0	15,9	1122,7	968,7	2468	13,36	150
Suomenojan hiilipölytuhka	24.1.2006	19,00	10,70	22.5.2006	103,0	100,0	31,6	1007,4	765,5	1950	12,22	150
Suomenojan hiilipölytuhka	24.1.2006	19,00	10,70	22.5.2006	103,0	100,0	31,6	1008,5	766,3	1952	12,23	150
Suomenojan hiilipölytuhka	24.1.2006	19,00	10,70	22.5.2006	103,0	100,0	31,6	1008,9	766,6	1953	12,24	150
Suomenojan leijupetiituhka	24.1.2006	11,30	14,85	22.5.2006	101,0	100,0	15,7	1432,2	1237,9	3154	17,72	150
Suomenojan leijupetiituhka	24.1.2006	11,30	14,85	22.5.2006	101,5	100,0	15,7	1436,9	1241,9	3164	17,69	150
Suomenojan leijupetiituhka	24.1.2006	11,30	14,85	22.5.2006	101,0	100,0	15,7	1436,6	1241,7	3163	17,77	150

PURISTUSNOPEUS: 5 kN/s

ICT-laitteella määritetyt arvot:						Huomautukset:	
Näytetunnus	Testaustapa	w (%) puristuksen jälkeen	Kappaleen kuivatiiv.paino (kN/m ³)	Tiivysaste (%)	Puristus	Puristuslujuus (MPa)	Testaus pvm:
Martilaakson hiilipölytuhma	lujuus 7d	19,7	11,51	88,57	1,50	0,19	29.5.06
Martilaakson hiilipölytuhma	lujuus 28d	16	11,52	88,61	2,30	0,29	19.6.06
Martilaakson hiilipölytuhma	lujuus 91d	18,5	11,53	88,66	2,46	0,31	21.8.06
Suomenojan hiilipölytuhma	lujuus 7d	37,6	9,28	86,77	1,95	0,25	29.5.06
Suomenojan hiilipölytuhma	lujuus 28d	30,9	9,29	86,87	2,14	0,27	19.6.06
Suomenojan hiilipölytuhma	lujuus 91d	48,3	9,30	86,90	1,95	0,25	21.8.06
Suomenojan leijupetiituhma	lujuus 7d	17,6	15,31	103,11	-	-	29.5.06
Suomenojan leijupetiituhma	lujuus 28d	15,6	15,29	102,93	1,73	0,22	19.6.06
Suomenojan leijupetiituhma	lujuus 91d	17,2	15,36	103,42	1,51	0,19	21.8.06